Fritjof Capra



La trama de la vida

Una nueva perspectiva de los sistemas vivos

ANAGRAMA
Colección Argumentos

Fritjof Capra

La trama de la vida

Una nueva perspectiva de los sistemas vivos

Traducción de David Sempau



EDITORIAL ANAGRAMA
BARCELONA

ÍNDICE

Título de la edición original:
The Web of Life
Anchor Books
Nueva York, 1996

Portada:
Julio Vivas
Ilustración de Jasmine Kaposi

Pedro de la Creu, 58
08034 Barcelona

ISBN: 84-339-0554-6
Depósito Legal: B. 891 8-1998

Printed in Spain

Liberduplex, S.L., Constitució, 19, 08014 Barcelona

A la memoria de mi madre,
Ingeborg Teuffenbach,
a quien debo el don y la disciplina de la escritura

NOTA DEL TRADUCTOR

La vida, en su infinita generosidad, nos reserva sorpresas y regalos a los que nos lleva por los caminos más insospechados. En invierno de 1991, curioseando por las estanterías de una tienda Nueva Era, me encontré cara a cara con un ejemplar de El punto crucial *de Fritjof Capra. Fue amor a primera vista, que no pudo consumarse de inmediato ya que mi situación económica no lo permitía. No obstante, en el verano del 92 lo recibí como regalo de aniversario. Ya desde las primeras páginas, tuve la fuerte sensación de hallarme en un viaje «de vuelta a casa» de la mano de un guía sumamente experto y documentado, viaje en el que iba encontrando confirmadas intuiciones, percepciones, inquietudes y esperanzas, descubriendo al mismo tiempo más y más derivaciones e interconexiones en una apasionante trama.*

El rigor del análisis, la cohesión de lo expuesto, la claridad de las ideas y la solidez, de los argumentos que caracterizan toda la obra, fruto todo ello -como después descubrí- de un trabajo exhaustivo, concienzudo, incansable e inspirado en todo momento por el noble afán de poner de manifiesto los orígenes y causas de los problemas más acuciantes de nuestra civilización y presentar alternativas viables, se convirtieron para mí en una base sólida desde la que emprender mi propio viaje hacia la autenticidad.

Siempre deseé que dicho viaje me permitiera conocer personalmente al hombre cuya obra había tenido un peso decisivo en la balanza, de mi vivencia personal y así, cuando una vez más la vida me mostró el camino al ofrecerme la lectura, de un artículo sobre el Schumacher College en el que se mencionaba a Fritjof Capra como profesor habitual de dicho centro, no dudé en pedir información sobre las actividades del mismo y solicitar una. beca para el siguiente curso a cargo del profesor. La beca me fue denegada, lo cual, dicho sea. de paso, resultó ser lo más conveniente ya que, por un lado, mi

situación económica seguía sin permitirme alegrías tales como los gastos del viaje y del resto del coste del curso, y por otro, como después supe, el curso Capra-93 fue bastante accidentado al declarársele al profesor un sarampión nada más llegar al College, lo que le obligó a impartirlo por megafonía durante más de la mitad de su duración a un grupo de alumnos que, por otra parte, resultó ser demasiado numeroso para la buena marcha del mismo.

No obstante seguí en la brecha y, al año siguiente, vi culminadas mis aspiraciones al recibir la confirmación de mi aceptación en el College y la concesión de la deseada beca, para el curso Capra-94. Dicho curso -al igual que el del año anterior- se desarrollaría bajo el título de «Ecología, Gaia y la visión sistémica de la vida» y estaría basado en el borrador que Fritjof Capra estaba estructurando para construir la obra que hoy tenéis en vuestras manos.

Evidentemente, un año tiene un peso específico notable en el desarrollo de una obra viva como el mencionado borrador, lo que me permitió acceder a una versión ya muy perfilada, del presente estudio dentro, por otra parte, de un curso mejor estructurado y que esta vez no se vio perjudicado por incidentes de salud.

*Durante las cinco semanas de intensa convivencia en las que se desarrolló el curso y con cuyos detalles no os quiero entretener pues sin duda estaréis deseosos de iniciar la lectura de la presente obra, tuve ocasión no sólo de compartir vivencias, búsquedas y descubrimientos intelectuales y espirituales con 25 compañeras y compañeros de 16 nacionalidades distintas y muy diversos orígenes, edades y condición, sino también de ir conociendo a Fritjof Capra, quien compartió, en compañía de su esposa Elizabeth y de su hija Juliette, las horas de refrigerio y asueto con sus alumnos. A través de las clases, las tutorías, los grupos de trabajo, las conversaciones privadas, los cafés compartidos y los enfrentamientos en la cancha de voleibol, tuve el privilegio de conocer al hombre, su modestia, su firmeza, su rigor y su fino sentido del humor, * estableciendo las bases de una relación con la que me sigo viendo honrado en la actualidad.*

Aun no siendo la traducción una actividad pública habitual para mí, el conocimiento de primera mano del contenido de la presente obra y la relación con su autor me animaron en su momento a solicitar del editor el honor de hacerme cargo de su versión en castellano, honor y responsabilidad que agradezco enornemente y a los que espero haber sabido corresponder.

* Para una mayor comprensión del perfil humano de Fritjof Capra y de su obra, recomiendo vivamente la lectura de su libro *Sabiduría insólita*..

Espero que halléis subsanada cualquier falta de profesionalidad con mi más devota dedicación al empeño de haber intentado transmitir fielmente tanto el contenido como la intención y la vocación de la presente obra, en cuya buena compañía os dejo con mis mejores deseos de paz, plenitud, prosperidad y armonía con la trama de la vida.

DAVID SEMPAU

Barcelona, diciembre de 1995

Esto sabemos.
Todo está conectado
como la sangre
que une a una familia...
Lo que le acaece a la tierra,
acaece a los hijos e hijas de la tierra.
El hombre no tejió la trama de la vida
es una mera hebra de la misma.
Lo que le haga a la trama,
se lo hace a sí mismo.

TED PERRY (inspirado en el Jefe Seattle)

Agradecimientos

La síntesis de conceptos e ideas presentada en este libro precisó de diez años de maduración. Durante dicho tiempo tuve la fortuna de poder discutir la mayoría de los modelos y teorías científicos subyacentes con sus autores y con otros científicos que trabajaban en los mismos campos. Deseo expresar mi especial agradecimiento:

- a Uva Prigogine por dos inspiradoras conversaciones al principio de los ochenta acerca de su teoría de las estructuras disipativas;
- a Francisco Varela por explicarme la teoría de Santiago de autopoiesis* y cognición a lo largo de varias horas de intensas discusiones en un refugio de esquí de Suiza y por numerosas y esclarecedoras conversaciones durante los últimos diez años sobre la ciencia cognitiva y sus aplicaciones;
- a Humberto Maturana por dos estimulantes conversaciones a mediados de los ochenta sobre cognición y consciencia;
- a Ralph Abraham por clarificar numerosas cuestiones en relación con las nuevas matemáticas de la complejidad;
- a Lynn Margulis por un inspirador diálogo en 1987 sobre la hipótesis Gaia y por animarme a publicar mi síntesis, que empezaba apenas a emerger por aquel entonces;
- a James Lovelock por una reciente y enriquecedora discusión sobre un amplio abanico de ideas científicas;
- a Heinz von Foerster por varias esclarecedoras conversaciones sobre la historia de la cibernética y los orígenes del concepto de autoorganización;

* En inglés *autopoiesis,* del griego *poíésis,* «creación», *depoieíni,* «crear», «hacer». *(N. del T.)*

- a Candace Pert por muchas y estimulantes conversaciones acerca de su investigación sobre péptidos;
- a Ame Naess, George Sessions, Wanvick Fox y Harold Glasser por inspiradoras discusiones filosóficas y a Douglas Tompkins por motivarme a profundizar más en la ecología profunda;
- a Gail Fleischaker por útiles conversaciones telefónicas e intercambios por correo sobre varios aspectos de la autopoiesis,
- y a Ernest Callenbach, Ed Clark, Raymond Dassman, Leonard Duhl, Alan Miller, Stephanie Mills y John Ryan por numerosas discusiones y correspondencia sobre los principios de ecología.

Durante los últimos años y mientras trabajaba en el libro, tuve diversas y valiosas ocasiones de presentar mis ideas ante colegas y estudiantes para su discusión crítica. Estoy en deuda con Satish Kumar por haberme invitado a impartir cursos sobre «La trama de la vida» en el Schumacher College de Inglaterra durante tres veranos consecutivos (1992-1994) y con mis estudiantes en esos tres cursos por sus innumerables preguntas críticas y útiles sugerencias. Estoy también agradecido a Stephan Harding por impartir seminarios sobre la teoría Gaia durante mis cursos y por su generosa ayuda en numerosas cuestiones relativas a la biología y a la ecología. Asimismo, deseo expresar mi agradecimiento a dos de mis estudiantes en Schumacher, William Holloway y Morten Flatau, por su ayuda en mis investigaciones."

Durante mi trabajo en el Center for Ecoliteracy de Berkelev, he tenido amplia oportunidad de discutir las características del pensamiento sistémico y de los principios de ecología con maestros y educadores, quienes me han ayudado en gran manera a pulir mi presentación de dichos conceptos e ideas. Deseo agradecer especialmente a Zenobia Barlow su organización de una serie de diálogos sobre alfabetización ecológica, durante los cuales tuvo efecto la mayoría de dichas discusiones.

Tuve también la excelente oportunidad de ofrecer varias partes de mi libro a la discusión crítica en la serie regular de «salones sistémicos» organizados por Joanna Macy entre 1993 y 1995. Estoy muy agradecido a Joanna y a mis colegas Tyrone Cashman y

* El lector interesado podrá encontrar una amplia referencia de las actividades del Schumacher College y de los cursos de Fritjof Capra en la entrevista que me concedió en junio de 1994 y que se publicó en las revistas *Cuerpomenle* (n." 29) y *3er Milenio* (n.° 17). *(N. del T.)*

Brian Swimme por las profundas discusiones sobre numerosas ideas mantenidas en estas íntimas reuniones.

Deseo agradecer a mi agente literario John Brockman sus ánimos y ayuda en la formulación del diseño inicial del libro que presenté a mis editores.

Mi agradecimiento a mi hermano Bernt Capra, a Trena Cicland, Stephan Harding y William Holloway por su lectura del manuscrito completo y sus inapreciables consejos y orientación. Deseo también expresar mi gratitud a John Todd y Raffi por sus comentarios a varios capítulos.

Mi especial reconocimiento a Julia Ponsonby por sus hermosos dibujos y su paciencia ante mis reiteradas modificaciones de los mismos.

Estoy igualmente agradecido a mi editor Charles Conrad en Anchor Books por su entusiasmo y sus útiles sugerencias.

Finalmente, mi agradecimiento muy especial para mi esposa Elizabeth y mi hija Juliette por su comprensión y paciencia durante muchos años, en los que una y otra vez he dejado su compañía para «ir arriba» a escribir durante largas horas.

En 1944 el físico austríaco Erwin Schrödinger escribió un librito titulado *¿Qué es la vida?,* en el que adelantaba una clara y convincente hipótesis sobre la estructura molecular de los genes. Este libro animó a los biólogos a reflexionar sobre la genética de un modo novedoso, abriendo así una nueva frontera a la ciencia: la biología molecular.

Durante las siguientes décadas, este nuevo campo generó una serie de descubrimientos triunfales que culminaron en el desciframiento del código genético. No obstante, estos espectaculares avances no consiguieron aproximar a los biólogos a la solución del enigma planteado en el título del libro de Schródinger. Tampoco eran más capaces de responder a las múltiples cuestiones vinculadas que han desafiado a científicos y filósofos durante centenares de años: ¿cómo evolucionaron complejas estructuras partiendo de una colección aleatoria de moléculas? ¿Cuál es la relación entre mente y cerebro? ¿Qué es la consciencia?

Los biólogos moleculares habían descubierto los componentes básicos de la vida, pero ello no les ayudaba a comprender las acciones integradoras vitales de los organismos vivos. Hace veinticinco años, uno de los principales biólogos moleculares, Sidney Brenner, hacía las siguientes reflexiones:

> De algún modo, podríamos decir que todo el trabajo realizado en los campos de la genética y de la biología molecular de los últimos sesenta años, podría ser considerado como un largo intervalo (...). Ahora que el programa ha sido completado, nos encontramos de nuevo con los problemas que se dejaron sin resolver. ¿Cómo se regenera un organismo dañado hasta recuperar exactamente la misma estructura que tenía antes de producirse el daño? ¿Cómo forma el huevo al organismo? (...) Creo que en

> los próximos veinticinco años deberemos enseñar Otro lenguaje a los biólogos (...). Desconozco aún su nombre, ¿quién sabe? (...) Quizás sea incorrecto pensar que toda la lógica se halla en el nivel molecular. Quizás debamos ir más allá de los mecanismos de relojería.[1]

Desde que Brenner hiciera estos comentarios, ciertamente ha emergido ciertamente un nuevo lenguaje para la comprensión de los complejos y altamente integradores sistemas de vida. Distintos científicos le dan nombres diferentes: «teoría de los sistemas dinámicos», «teoría de la complejidad», «dinámica no-lineal», «dinámica de redes», etc. Los atractores caóticos, los fractales, las estructuras disipativas, la autoorganización y las redes autopoiésicas son algunos de sus conceptos clave.

Este planteamiento de la comprensión de la vida es seguido por sobresalientes investigadores y sus equipos en todo el mundo. Ilya Prigogine en la Universidad de Bruselas, Humberto Maturana en la Universidad de Chile en Santiago, Francisco Várela en la Escuela Politécnica de París, Lynn Margulis en la Universidad de Massachusetts, Benoít Mandelbrot en la Universidad de Yale y Stuart Kauffinan en el Instituto de Santa Fe, por citar sólo algunos. Varios descubrimientos de estos científicos, aparecidos en libros y publicaciones especializadas, han sido ensalzados como revolucionarios.

No obstante, hasta hoy nadie había propuesto una síntesis completa que integrase los nuevos descubrimientos en un único contexto, permitiendo así al lector común su comprensión de modo coherente. Éste es el reto y la promesa de *La trama de la vida.*

La nueva comprensión de la vida debe ser contemplada como la vanguardia científica del cambio de paradigmas, desde una concepción del mundo mecanicista hacia una ecológica, como ya comenté en mi libro *El punto crucial.* La presente obra es, en cierto modo, la continuación y expansión del capítulo de *El punto crucial* titulado «La visión sistémica de la vida».

La tradición intelectual del pensamiento sistémico y los modelos y teorías de sistemas vivos desarrollados durante las primeras décadas del siglo, forman las raíces históricas y conceptuales del marco científico del que se ocupa este libro. De hecho, la síntesis de teorías y modelos actuales que propongo aquí, puede ser contemplada como el esbozo de una emergente teoría de los sistemas vivos capaz de ofrecer una visión unificada de mente, materia y vida.

Éste es un libro para el lector común. He utilizado un lenguaje tan llano como me ha sido posible y he intentado definir los términos técnicos desde su primera aparición en el texto. No obstante, las ideas, modelos y teorías que analizo son complejos y en ocasiones he sentido la necesidad de profundizar en algunos aspectos técnicos para facilitar la transmisión de su esencia. Esto sucede especialmente en algunas partes de los capítulos 5 y 6 y en la primera parte del capítulo 9. El lector poco interesado en los detalles técnicos puede optar entre curiosear dichas partes o simplemente obviarlas en su totalidad, sin ningún temor a perder el hilo principal de mis argumentos.

También observará el lector que el texto incluye no sólo numerosas referencias bibliográficas, sino también abundantes referencias cruzadas a páginas del mismo libro. En mi esfuerzo de comunicar una trama compleja de conceptos e ideas dentro de las limitaciones lineales del lenguaje escrito, he creído que sería de ayuda interconectar el texto con una red de anotaciones. Espero que el lector encuentre que, como la trama de la vida, el libro es, en sí mismo, un todo que es más que la suma de sus partes.

FRITJOF CAPRA
Berkeley, agosto de 1995

Primera parte

El contexto cultural

I. ECOLOGÍA PROFUNDA: UN NUEVO PARADIGMA

Este libro trata de una nueva comprensión científica de la vida en todos los niveles de los sistemas vivientes: organismos, sistemas sociales y ecosistemas. Se basa en una nueva percepción de la realidad con profundas implicaciones no sólo para la ciencia y la filosofía, sino también para los negocios, la política, la sanidad, la educación y la vida cotidiana. Parece por lo tanto apropiado empezar con una descripción del amplio contexto social y cultural en el que se inscribe esta nueva concepción de la vida.

CRISIS DE PERCEPCIÓN

A medida que el siglo se acerca a su fin, los temas medioambientales han adquirido una importancia primordial. Nos enfrentamos a una serie de problemas globales que dañan la biosfera y la vida humana de modo alarmante y que podrían convertirse en irreversibles en breve. Disponemos ya de amplia documentación sobre la extensión y el significado de dichos problemas.[1]

Cuanto más estudiamos los principales problemas de nuestro tiempo, más nos percatamos de que no pueden ser entendidos aisladamente. Se trata de problemas sistémicos, lo que significa que están interconectados y son interdependientes. Por ejemplo, sólo se podrá estabilizar la población del globo cuando la pobreza se reduzca planetariamente.

La extinción en gran escala de especies de animales y plantas continuará mientras el hemisferio sur siga bajo el peso de deudas masivas. La escasez de recursos y el deterioro medioambiental se combinan con poblaciones en rápido crecimiento, llevando al colapso a las comunidades locales así como a la violencia étnica y

tribal, que se ha convertido en la principal característica de la posguerra fría.

En última instancia estos problemas deben ser contemplados como distintas facetas de una misma crisis, que es en gran parte una crisis de percepción. Deriva del hecho de que la mayoría de nosotros, y especialmente nuestras grandes instituciones sociales, suscriben los conceptos de una visión desfasada del mundo, una percepción de la realidad inadecuada para tratar con nuestro superpoblado y globalmente interconectado mundo.

Hay soluciones para los principales problemas de nuestro tiempo, algunas muy sencillas, pero requieren un cambio radical en nuestra percepción, en nuestro pensamiento, en nuestros valores. Nos hallamos sin duda en el inicio de este cambio fundamental de visión en la ciencia y la sociedad, un cambio de paradigmas tan radical como la revolución copernicana. Pero esta constatación no ha llegado aún a la mayoría de nuestros líderes políticos. El reconocimiento de la necesidad de un profundo cambio de percepción y pensamiento capaz de garantizar nuestra supervivencia, no ha alcanzado todavía a los responsables de las corporaciones ni a los administradores y profesores de nuestras grandes universidades.

Nuestros líderes no sólo son incapaces de percibir la interconexión de los distintos problemas sino que además se niegan a reconocer hasta qué punto lo que ellos llaman sus soluciones comprometen el futuro de generaciones venideras. Desde la perspectiva sistémica, las únicas soluciones viables son aquellas que resulten «sostenibles». El concepto de sostenibilidad se ha convertido en un elemento clave en el movimiento ecológico y es sin duda crucial. Lester Brown, del Worldwatch Institute, ha dado una simple, clara y hermosa definición: «Una sociedad sostenible es aquella capaz de satisfacer sus necesidades sin disminuir las oportunidades de generaciones futuras.»[2] Éste, en pocas palabras, es el gran desafío de nuestro tiempo: crear comunidades sostenibles, es decir, entornos sociales y culturales en los que podamos satisfacer nuestras necesidades y aspiraciones sin comprometer el futuro de las generaciones que han de seguirnos.

EL CAMBIO DE PARADIGMA

En mi trayectoria como físico, me ha interesado principalmente el dramático cambio de conceptos e ideas que tuvo lugar en la física a lo largo de las tres primeras décadas del siglo y que sigue

teniendo consecuencias en nuestras teorías actuales sobre la materia. Los nuevos conceptos en física han significado un cambio profundo en nuestra visión del mundo: desde la perspectiva me--anicista de Descartes y Newton hasta una visión ecológica y holis tica.

La nueva visión de la realidad no resultó en absoluto fácil de aceptar a los físicos de principios de siglo. La exploración del mundo atómico y subatómico les puso en contacto con una extraña e inesperada realidad. En su esfuerzo por comprenderla, los científicos Rieron dándose cuenta penosamente de que sus conceptos básicos, su lenguaje científico y su misma manera de pensar resultaban inadecuados para describir los fenómenos atómicos. Sus problemas no se limitaban a lo estrictamente intelectual, sino que alcanzaban la dimensión de una intensa crisis emocional o hasta podríamos decir existencial. Necesitaron mucho tiempo para superar esta crisis, pero al final se vieron recompensados con profundas revelaciones sobre la naturaleza de la materia y su relación con la mente humana.[3]

Los dramáticos cambios de pensamiento que tuvieron lugar en la física a principios de siglo han sido ampliamente discutidos por físicos y filósofos a lo largo de más de cincuenta años. Llevaron a Thomas Kuhn a la noción de «paradigma» científico, definido como «una constelación de logros -conceptos, valores, técnicas, etc.- compartidos por una comunidad científica y usados por ésta para definir problemas y soluciones legítimos».[4] Los distintos paradigmas, según Kuhn, se suceden tras rupturas discontinuas y revolucionarias llamadas «cambios de paradigma».

Hoy, veinticinco años después del análisis de Kuhn, reconocemos el cambio de paradigma en la física como parte integrante de una transformación cultural mucho más amplia. Actualmente revivimos la crisis intelectual de los físicos cuánticos de los años veinte, en forma de una crisis cultural similar pero de proporciones mucho más amplias. Consecuentemente, asistimos a un cambio de paradigmas, no sólo en la ciencia, sino también en el más amplio contexto social.[5] Para analizar esta transformación cultural, he generalizado la definición de Kuhn del paradigma científico a la del paradigma social, que describo como «una constelación de conceptos, valores, percepciones y prácticas compartidos por una comunidad, que conforman una particular visión de la realidad que, a su vez, es la base del modo en que dicha comunidad se organiza».[6]

El paradigma ahora en recesión ha dominado nuestra cultura a lo largo de varios centenares de años, durante los que ha con-

formado nuestra sociedad occidental e influenciado considerablemente el resto del mundo. Dicho paradigma consiste en una enquistada serie de ideas y valores, entre los que podemos citar la visión del universo como un sistema mecánico compuesto de piezas, la del cuerpo humano como una máquina, la de la vida en sociedad como una lucha competitiva por la existencia, la creencia en el progreso material ilimitado a través del crecimiento económico y tecnológico y, no menos importante, la convicción de que una sociedad en la que la mujer está por doquier sometida al hombre, no hace sino seguir las leyes naturales. Todas estas presunciones se han visto seriamente cuestionadas por los acontecimientos recientes, hasta el punto de que su reconsideración radical está ocurriendo en nuestros días.

ECOLOGÍA PROFUNDA

El nuevo paradigma podría denominarse una visión holística del mundo, ya que lo ve como un todo integrado más que como una discontinua colección de partes. También podría llamarse una visión ecológica, usando el término «ecológica» en un sentido mucho más amplio y profundo de lo habitual. La percepción desde la ecología profunda reconoce la interdependencia fundamental entre todos los fenómenos y el hecho de que, como individuos y como sociedades, estamos todos inmersos en (y finalmente dependientes de) los procesos cíclicos de la naturaleza.

Los términos «holístico» y «ecológico» difieren ligeramente en sus significados y parecería que el primero de ellos resulta menos apropiado que el segundo para describir el nuevo paradigma. Una visión holística de, por ejemplo, una bicicleta significa verla como un todo funcional y entender consecuentemente la interdependencia de sus partes. Una visión ecológica incluiría esto, pero añadiría la percepción de cómo la bicicleta se inserta en su entorno natural y social: de dónde provienen sus materias primas, cómo se construyó, cómo su utilización afecta al entorno natural y a la comunidad en que se usa, etc. Esta distinción entre «holístico» y «ecológico» es aún más importante cuando hablamos de sistemas vivos, para los que las conexiones con el entorno son mucho más vitales.

El sentido en que uso el término «ecológico» está asociado con una escuela filosófica específica, es más, con un movimiento de base conocido como «ecología profunda», que está ganando

prominencia rápidamente.[7] Esta escuela fue fundada por el filósofo noruego Arne Naess a principios de los setenta al distinguir la ecología «superficial» y la «profunda». Esta distinción está ampliamente aceptada en la actualidad como referencia muy útil en el discernimiento entre las líneas de pensamiento ecológico contemporáneas.

La ecología superficial es antropocéntrica, es decir, está centrada en el ser humano. Ve a éste por encima o aparte de la naturaleza, como fuente de todo valor, y le da a aquélla un valor únicamente instrumental, «de uso». La ecología profunda no separa a los humanos -ni a ninguna otra cosa- del entorno natural. Ve el mundo, no como una colección de objetos aislados, sino como una red de fenómenos fundamentalmente interconectados e interdependientes. La ecología profunda reconoce el valor intrínseco de todos los seres vivos y ve a los humanos como una mera hebra de la trama de la vida.

En última instancia, la percepción ecológica es una percepción espiritual o religiosa. Cuando el concepto de espíritu es entendido como el modo de consciencia en el que el individuo experimenta un sentimiento de pertenencia y de conexión con el cosmos como un todo, queda claro que la percepción ecológica es espiritual en su más profunda esencia. No es por tanto sorprendente que la nueva visión de la realidad emergente, basada en la percepción ecológica, sea consecuente con la llamada filosofía perenne de las tradiciones espirituales, tanto si hablamos de la espiritualidad de los místicos cristianos, como de la de los budistas, o de la filosofía y cosmología subyacentes en las tradiciones nativas americanas.[8]

Hay otra manera en que Arne Naess ha caracterizado la ecología profunda. «La esencia de la ecología profunda», dice, «es plantear cuestiones cada vez más profundas.»[9] Ésta es asimismo la esencia de un cambio de paradigma.

Necesitamos estar preparados para cuestionar cada aspecto del viejo paradigma. Quizás no resultará necesario desdeñarlos en su totalidad, pero, antes de saberlo, deberemos tener la voluntad de cuestionarlos en su totalidad. Así pues, la ecología profunda plantea profundas cuestiones sobre los propios fundamentos de nuestra moderna, científica, industrial, desarrollista y materialista visión del mundo y manera de vivir. Cuestiona su paradigma completo desde una perspectiva ecológica, desde la perspectiva de nuestras relaciones con los demás, con las generaciones venideras y con la trama de la vida de la que formamos parte.

Además de la ecología profunda, hay otras dos escuelas filosóficas de ecología: la ecología social y la ecología feminista o «ecofeminismo». En publicaciones filosóficas de los últimos años se ha establecido un vivo debate sobre los méritos relativos de la ecología profunda, la ecología social y el ecofeminismo.[10] Pienso que cada una de las tres aborda aspectos importantes del paradigma ecológico y que, lejos de competir entre ellos, sus defensores deberían integrar sus planteamientos en una visión ecológica coherente.

La percepción desde la ecología profunda parece ofrecer la base filosófica y espiritual idónea para un estilo de vida ecológico y para el activismo medioambiental. No obstante, no nos dice mucho acerca de las características culturales y los patrones de organización social que han acarreado la presente crisis ecológica. Éste es el objetivo de la ecología social.[11]

El terreno común de varias escuelas dentro de la ecología social es el reconocimiento de que la naturaleza fundamentalmente antiecológica de muchas de nuestras estructuras sociales y económicas y de sus tecnologías, tiene sus raíces en lo que Riane Eisler ha denominado el «sistema dominador» de la organización social.[12] Patriarcado, imperialismo, capitalismo y racismo son algunos ejemplos de la dominación social que son en sí mismos explotadores y antiecológicos. Entre las distintas escuelas de ecología social se cuentan varios grupos anarquistas y marxistas que utilizan sus respectivos marcos conceptuales para analizar distintos patrones de dominación social.

El ecofeminismo podría verse como una escuela específica dentro de la ecología social, ya que se dirige a la dinámica básica de la dominación social en el contexto del patriarcado. No obstante, su análisis cultural de múltiples facetas del patriarcado y de los vínculos entre feminismo y ecología va mucho más allá del marco conceptual de la ecología social. Los ecofeministas ven la dominación patriarcal del hombre sobre la mujer como el prototipo de toda dominación y explotación en sus variadas formas de jerarquía, militarismo, capitalismo e industrialización. Señalan que la explotación de la naturaleza en particular ha ido de la mano con la de la mujer, que ha sido identificada con la naturaleza a través de los tiempos. Esta antigua asociación entre mujer y naturaleza vincula la historia de la mujer con la del medio ambiente y es el origen de la afinidad natural entre feminismo y ecología.[13] Consecuentemente, el ecofeminismo ve el conocimiento vivencial femenino como la principal fuente para una visión ecológica de la realidad.[14]

NUEVOS VALORES

En esta breve descripción del paradigma ecológico emergente, he enfatizado hasta ahora los cambios de percepciones y modos de pensamiento. Si ello fuese todo lo que necesitásemos, la transición hacia el nuevo paradigma resultaría relativamente fácil. Hay pensadores suficientemente elocuentes y convincentes en el movimiento de la ecología profunda como para convencer a nuestros líderes políticos y económicos de los méritos del nuevo pensamiento. Pero ésta es sólo una parte del problema. El cambio de paradigmas requiere una expansión no sólo de nuestras percepciones y modos de pensar, sino también de nuestros valores.

Resulta aquí interesante señalar la sorprendente conexión entre los cambios de pensamiento y de valores. Ambos pueden ser contemplados como cambios desde la asertividad a la integración. Ambas tendencias -la asertiva y la integrativa- son aspectos esenciales de todos los sistemas vivos.[15] Ninguna es intrínsecamente buena o mala. Lo bueno o saludable es un equilibrio dinámico entre ambas y lo malo o insalubre es su desequilibrio, el enfatizar desproporcionadamente una en detrimento de la otra. Si contemplamos desde esta perspectiva nuestra cultura industrial occidental, veremos que hemos enfatizado las tendencias asertivas a costa de las integrativas. Ello resulta evidente al mismo tiempo en maestro pensamiento y en nuestros valores y resulta muy instructivo emparejar estas tendencias opuestas:

Pensamiento		**Valores**	
Asertivo	*Integrativo*	*Asertivo*	*Integrativo*
racional	intuitivo	expansión	conservación
analítico	sintético	competición	cooperación
reduccionista	holístico	cantidad	Calidad
lineal	no-lineal	dominación	asociación

Los valores asertivos -competición, expansión, dominación- están generalmente asociados a los hombres. Efectivamente, en una sociedad patriarcal éstos no sólo se ven favorecidos, sino también recompensados económicamente y dotados de poder

político. Ésta es una de las razones por las que el cambio hacia un sistema de valores más equilibrado resulta tan difícil para la mayoría de personas y especialmente para los hombres.

El poder, en el sentido de dominación sobre los demás, es asertividad excesiva. La estructura social en que se ejerce con mayor eficacia es la jerarquía. Si duda, nuestras estructuras políticas, militares y corporativas están ordenadas jerárquicamente, con hombres generalmente situados en los niveles superiores y mujeres en los inferiores. La mayoría de estos hombres y algunas de las mujeres han llegado a identificar su posición en la jerarquía como parte de sí mismos, por lo que el cambio a un sistema de valores distinto representa para ellos un temor existencial.

Existe, no obstante, otra clase de poder más apropiada para el nuevo paradigma: el poder como influencia sobre otros. La estructura ideal para el ejercicio de esta clase de poder no es la jerarquía, sino la red que, como veremos, es la metáfora central de la ecología.[16] El cambio de paradigma incluye por tanto el cambio de jerarquías a redes en la organización social.

ETICA

Toda la cuestión de los valores es crucial en la ecología profunda, es en realidad su característica definitoiia central. Mientras que el viejo paradigma se basa en valores antropocéntricos (centrados en el hombre), la ecología profunda tiene sus bases en valores ecocéntricos (centrados en la tierra). Es una visión del mundo que reconoce el valor inherente de la vida no humana. Todos los seres vivos son miembros de comunidades ecológicas vinculados por una red de interdependencias. Cuando esta profunda percepción ecológica se vuelve parte de nuestra vida cotidiana, emerge un sistema ético radicalmente nuevo.

Dicha ética, profundamente ecológica, se necesita urgentemente hoy en día y muy especialmente en la ciencia, puesto que mucho de lo que los científicos están haciendo no es constructivo y respetuoso con la vida, sino todo lo contrario. Con físicos diseñando sistemas de armas capaces de borrar la vida de la faz de la tierra, con químicos contaminando el planeta, con biólogos soltando nuevos y desconocidos microorganismos sin conocer sus consecuencias, con psicólogos y otros científicos torturando animales en nombre del progreso científico, con todo ello en marcha, la introducción de unos estándares «ecoéticos» en el mundo científico parece de la máxima urgencia.

Generalmente no está admitido que los valores no son algo externo a la ciencia y a la tecnología, sino que constituyen su misma base y motivación. Durante la revolución científica del siglo XVII se separaron los valores de los hechos y, desde entonces, tendemos a creer que los hechos científicos son independientes de lo que hacemos y por lo tanto de nuestros valores. En realidad, el hecho científico surge de una constelación completa de percepciones, valores y acciones humanas, es decir, de un paradigma del que no puede ser desvinculado. Si bien gran parte de la investigación detallada puede no depender explícitamente del sistema de valores del científico que la efectúa, el paradigma más amplio en el que su investigación tiene lugar nunca estará desprovisto de un determinado sistema de valores. Los científicos, por lo tanto, son responsables de su trabajo no sólo intelectualmente, sino también moralmente.

Dentro del contexto de la ecología profunda, el reconocimiento de valores inherentes a toda naturaleza viviente está basado en la experiencia profundamente ecológica o espiritual de que naturaleza y uno mismo son uno. Esta expansión del uno mismo hasta su identificación con la naturaleza es el fundamento de la ecología profunda, como Arne Naess manifiesta claramente :

> El cuidado* fluye naturalmente cuando el «sí mismo» se amplía y profundiza hasta el punto de sentir y concebir la protección de la Naturaleza libre como la de nosotros mismos... Al igual que no precisamos de la moral para respirar (...) [igualmente] si nuestro «sí mismo», en el sentido más amplio, abarca a otro ser, no precisamos de ninguna exhortación moral para evidenciar cuidado (...). Cuidamos por nosotros mismos, sin precisar ninguna presión moral (...). Si la realidad es como la que experimenta nuestro ser ecológico, nuestro comportamiento sigue *natural* y perfectamente normas de estricta ética medioambiental.[17]

Lo que esto implica es que la conexión entre la percepción ecológica del mundo y el correspondiente comportamiento no es

* En inglés *care,* cuidado, esmero, atención, delicadeza, precaución. Términos todos ellos adecuados para lo que se mienta transmitir: una respetuosa, cuasirreverencial, relación del ser humano con la naturaleza. *(N. del T.)*

una conexión lógica, sino *psicológica.*[18] La lógica no nos conduce desde el hecho de que somos parte integrante de la trama de la vida a ciertas normas sobre cómo deberíamos vivir. En cambio, desde la percepción o experiencia ecológica de ser parte de la trama de la vida, *eslaremos* (en oposición a *deberíamos estar)* inclinados al cuidado de toda naturaleza viviente. En realidad, difícilmente podríamos reprimirnos de responder de tal modo.

El vínculo entre ecología y psicología establecido desde el concepto del «sí mismo ecológico» ha sido explorado recientemente por varios autores. La ecóloga profunda Joanna Macy escribe sobre el «reverdecimiento del sí mismo»,[19] el filósofo Warwick Fox ha acuñado el término «ecología transpersonal»[20] y el historiador cultural Theodore Roszak utiliza el término «ecopsicología»[21] para expresar la profunda conexión entre ambos campos, que hasta hace poco se veían completamente separados.

EL CAMBIO DE LA FÍSICA A LAS CIENCIAS DE LA VIDA

Al llamar «ecológica», en el sentido de la ecología profunda, a la nueva visión de la realidad, enfatizamos que la vida está en su mismo centro. Éste es un punto importante para la ciencia ya que en el viejo paradigma, la física ha sido el modelo y la fuente de metáforas para las demás ciencias. «Toda la filosofía es como un árbol», escribía Descartes. «Las raíces son la metafísica, el tronco la física y las ramas todas las otras ciencias.»[22]

La ecología profunda ha sobrepasado la metáfora cartesiana. Si bien el cambio de paradigma en la física sigue siendo de interés por haber sido el primero en producirse dentro de la ciencia moderna, la física ha perdido su rol como principal ciencia proveedora de la descripción fundamental de la realidad. Esto, no obstante, aún no está ampliamente reconocido; con frecuencia, científicos y no científicos mantienen la creencia popular de que «si buscas realmente la explicación definitiva, debes preguntar a un físico», lo cual constituye verdaderamente una falacia cartesiana. Hoy, el cambio de paradigma en la ciencia, en su nivel más profundo, implica un cambio desde la física a las ciencias de la vida.

Segunda parte

La emergencia del pensamiento sistémico

2. DE LAS PARTES AL TODO

Durante el presente siglo, el cambio desde el paradigma mecanicista al ecológico se ha producido en distintas formas, a distintas velocidades, en los diversos campos científicos. No es un cambio uniforme. Engloba revoluciones científicas, contragolpes y movimientos pendulares. Un péndulo caótico en el sentido de la teoría del caos[1] -oscilaciones que casi se repiten pero no exactamente, aparentemente de modo aleatorio pero formando en realidad un patrón complejo y altamente organizado- sería quizás la metáfora contemporánea más apropiada.

La tensión básica se da entre las partes y el todo. El énfasis sobre las partes se ha denominado mecanicista, reduccionista o atomista, mientras que el énfasis sobre el todo recibe los nombres de holístico, organicista o ecológico. En la ciencia del siglo xx la perspectiva holística ha sido conocida como «sistémica» y el modo de pensar que comporta como «pensamiento sistémico». En este libro, usaré «ecológico» y «sistémico» indistintamente, siendo «sistémico» meramente el término más científico o técnico.

Las principales características del pensamiento sistémico emergieron simultáneamente en diversas disciplinas durante la primera mitad del siglo, especialmente en los años veinte. El pensamiento sistémico fue encabezado por biólogos, quienes pusieron de relieve la visión de los organismos vivos como totalidades integradas. Posteriormente, se vio enriquecido por la psicología Gestalt y la nueva ciencia de la ecología, teniendo quizás su efecto más dramático en la física cuántica. Ya que la idea central del nuevo paradigma se refiere a la naturaleza de la vida, centrémonos primero en la biología.

La tensión entre mecanicismo y holismo ha sido lema recurrente a lo largo de la historia de la biología y es una consecuencia inevitable de la vieja dicotomía entre substancia (materia, estructura, cantidad) y forma (patrón, orden cualidad). El aspecto biológico es más que una forma, más que una configuración estática de componentes en un todo. Hay un flujo continuo de materia a través de un organismo vivo mientras que su forma se mantiene. Hay desarrollo y hay evolución. Por lo tanto, la comprensión del aspecto biológico está inextricablemente ligada a la comprensión de los procesos metabólicos y relativos al desarrollo.

En el alba de la filosofía y la ciencia occidentales, los pitagóricos distinguían «número» o patrón, de substancia o materia, y lo veían como algo que limitaba la materia y le daba forma. En palabras de Gregory Bateson:

> El asunto tomó la forma de «¿Preguntas de qué está hecho -tierra, fuego, agua, etc.?», o preguntas «¿Cuál es su *patrón?»* Los pitagóricos preferían inquirir sobre el patrón a hacerlo sobre la substancia.[2]

Aristóteles, el primer biólogo de la tradición occidental, distinguía también entre materia y forma pero al mismo tiempo las vinculaba mediante el proceso de desarrollo.[3] En contraste con Platón, Aristóteles creía que la forma no tenía una existencia separada sino que era inmanente en la materia y que ésta tampoco podía existir aisladamente de la forma. La materia, según Aristóteles, contenía la naturaleza esencial de todas las cosas, pero sólo como potencialidad. Por medio de la forma, esta esencia se convertía en real o actual. El proceso de la autorrealización de la esencia en el fenómeno real fue denominado por Aristóteles *enteleqitia* («autocompleción»).* Se trata de un proceso de desarrollo, un empuje hacia la plena autorrealización. Materia y forma son caras de dicho proceso, separables sólo mediante la abstracción.

Aristóteles creó un sistema formal de lógica y un conjunto de conceptos unificadores que aplicó a las principales disciplinas de su tiempo: biología, física, metafísica, ética y política. Su filosofía y ciencia dominaron el pensamiento occidental durante dos mil

* En la filosofía aristotélica, estado de perfección hacia el cual tiende cada especie de ser. *(N. del T.)*

años después de su muerte, en los que su autoridad fue casi tan incuestionada como la de la Iglesia.

EL MECANICISMO CARTESIANO

En los siglos XVI y XVII la visión medieval del mundo, basada en la filosofía aristotélica y en la teología cristiana, cambió radicalmente. La noción de un universo orgánico, viviente y espiritual fue reemplazada por la del mundo como máquina, y ésta se convirtió en la metáfora dominante de la era moderna. Este cambio radical fue propiciado por los nuevos descubrimientos en física, astronomía y matemáticas conocidos como la Revolución científica y asociados con los nombres de Copérnico, Galileo, Descartes, Bacon y Newton.[4]

Galileo Galilei excluyó la cualidad de la ciencia, restringiendo ésta al estudio de fenómenos que pudiesen ser medidos y cuantificados. Ésta ha sido una estrategia muy exitosa en la ciencia moderna, pero nuestra obsesión por la medición y la cuantificación ha tenido también importantes costes, como erráticamente describe el psiquiatra R. D. Laing:

> El programa de Galileo nos ofrece un mundo muerto: fuera quedan la vista, el sonido, el gusto, el tacto y el olor y con ellos desaparecen la sensibilidad estética y ética, los valores, las cualidades, el alma, la consciencia y el espíritu. La experiencia como tal queda excluida del reino del discurso científico. Probablemente nada haya cambiado tanto nuestro mundo en los últimos cuatrocientos años como el ambicioso programa de Galileo. Teníamos que destruir el mundo primero en teoría, para poder hacerlo después en la práctica.[5]

René Descartes creó el método de pensamiento analítico, consistente en desmenuzar los fenómenos complejos en partes para comprender, desde las propiedades de éstas, el funcionamiento del todo. Descartes basó su visión de la naturaleza en la fundamental división entre dos reinos independientes y separados: el de la mente y el de la materia. El universo material, incluyendo los organismos vivos, era para Descartes una máquina que podía ser enteramente comprendida analizándola en términos de sus parles más pequeñas.

El marco conceptual creado por Galileo y Descartes -el

mundo como una máquina perfecta gobernada por leves matemáticas exactas- fue triunfalmente completado por Isaac Newton, cuya gran síntesis -la mecánica newtoniana- constituyó el logro culminante de la ciencia del siglo XVII. En biología, el mayor éxito del modelo mecanicista de Descartes fue su aplicación al fenómeno de la circulación sanguínea por William Harvey. Inspirados por el éxito de Harvey, los fisiólogos de su tiempo intentaron aplicar el modelo mecanicista para explicar otras funciones del cuerpo humano como la digestión y el metabolismo. Tales intentos acabaron no obstante en fracaso, dado que los fenómenos que los fisiólogos intentaban explicar conllevaban procesos químicos desconocidos en la época y que no podían ser descritos en términos mecanicistas. La situación cambió substancialmente en el siglo XVIII, cuando Antoine Lavoisier, el «padre de la química moderna», demostró que la respiración era una íorma específica de oxidación, confirmando así la importancia de los procesos químicos en el funcionamiento de los organismos vivos.

A la luz de la nueva química, los simplistas modelos mecanicistas fueron abandonados en gran medida, pero la esencia de la idea cartesiana sobrevivió. A los animales se les seguía viendo como máquinas, si bien más complicadas que simples mecanismos de relojería e incluyendo complejos procesos químicos. Consecuentemente, el mecanicismo cartesiano quedó expresado como dogma en el concepto de que, en última instancia, las leyes de la biología pueden ser reducidas a las de la física y la química. Simultáneamente, la rígida fisiología mecanicista encontró su más potente y elaborada expresión en el polémico tratado de Julien de La Mettrie *El hombre máquina,* que mantuvo su fama más allá del siglo XVIII y generó múltiples debates y controversias, algunas de las cuales alcanzaron hasta el siglo xx.[6]

EL MOVIMIENTO ROMÁNTICO

La primera oposición frontal al paradigma cartesiano mecanicista partió del movimiento romántico en el arte, la literatura y la filosofía a finales del siglo XVIII y en el siglo XIX. William Blake, el gran poeta místico y pintor que ejerció una fuerte influencia en el Romanticismo británico, fue un apasionado crítico de Newton. Resumió su crítica en estas celebradas líneas:

Líbrenos Dios
de la visión simplista y del sueño de Newton' *

Los poetas y filósofos románticos alemanes volvieron a la tradición aristotélica, concentrándose en la naturaleza de la forma orgánica. Goethe, la figura central de este movimiento, fue uno de los primeros en utilizar el término «morfología» para el estudio de la forma biológica desde una perspectiva dinámica y del desarrollo. Admiraba el «orden en movimiento» *(bewegliche ordnung)* de la naturaleza y concebía la forma como un patrón de relaciones en el seno de un todo organizado, concepto que está en la vanguardia del pensamiento sistémico contemporáneo. «Cada criatura», escribía Goethe, «no es sino una gradación paulada *(schattierung)* de un gran y armonioso todo.»[8] Los artistas románticos se ocupaban básicamente de la comprensión cualitativa de los patrones o pautas y, por lo tanto, ponían gran énfasis en la explicación de las propiedades básicas de la vida en términos de formas visuales. Goethe en particular sentía que la percepción visual era la vía de acceso a la comprensión de la forma orgánica.[9]

La comprensión de la forma orgánica jugó también un papel primordial en la filosofía de Emmanuel Kant, considerado frecuentemente el más grande de los filósofos modernos. Idealista, Kant separaba el mundo de los fenómenos de un mundo de «las-cosas-en-sí-mismas». Creía que la ciencia podía ofrecer únicamente explicaciones mecanicistas y afirmaba que, en áreas en las que tales explicaciones resultasen insuficientes, el conocimiento científico debía ser completado con la consideración del propio propósito de la naturaleza. La más importante de estas áreas, según Kant, sería la comprensión de la vida.[10]

En su *Crítica a la razón,* Kant discutió la naturaleza de los organismos. Argumentaba que éstos, en contraste con las máquinas, son autorreproductores y autoorganizadores. En una máquina, según Kant, las partes sólo existen unas *para* las otras, en el sentido de apoyarse mutuamente dentro de un lodo funcional, mientras que en un organismo, las partes existen además *por medio de* las otras, en el sentido de producirse entre sí." «Debemos ver cada parte como un órgano», decía Kant, «que produce las otras partes (de modo que cada una produce recíprocamente las

* La rima en inglés es como sigue: *«May God us keep / from single visión and Newton's sleep.» (N. de! T.)*

otras)... Debido a esto, [el organismo] será a la vez un ser organizado y autoorganizador».[12] Con esta afirmación, Kant se convertía no sólo en el primero en utilizar el término «autoorganización» para definir la naturaleza de los organismos vivos, sino que además lo usaba de modo notablemente similar a algunos de los conceptos contemporáneos.[13]

La visión romántica de la naturaleza como «un gran todo armonioso», en palabras de Goethe, condujo a algunos científicos de la época a extender su búsqueda de la totalidad al planeta entero y percibir la Tierra como un todo integrado, como un ser vivo. Esta visión de la Tierra viviente tiene, por supuesto, una larga tradición. Las imágenes míticas de la Madre Tierra se cuentan entre las más antiguas de la historia religiosa de la humanidad. Gaia, la diosa Tierra, fue reverenciada como deidad suprema en los albores de la Grecia prehelénica.[14] Antes aún, desde el Neolítico hasta la Edad del Bronce, las sociedades de la «Vieja Europa» adoraban numerosas deidades femeninas como encarnaciones de la Madre Tierra.[15]

La idea de la Tierra como un ser vivo y espiritual continuó floreciendo a través de la Edad Media y del Renacimiento, hasta que toda la visión medieval fue reemplazada por la imagen cartesiana del mundo-máquina. Así, cuando los científicos de siglo XVIII empezaron a visualizar la Tierra como un ser vivo, revivieron una antigua tradición que había permanecido dormida durante un período relativamente breve.

Más recientemente, la idea de un planeta vivo ha sido formulada en el lenguaje científico moderno en la llamada hipótesis Gaia y resulta interesante comprobar que las visiones de la Tierra viva desarrolladas por los científicos del siglo XVIII, contienen algunos de los elementos clave de nuestra teoría contemporánea.[16] El geólogo escocés James Hutton mantiene que los procesos geológicos y biológicos están vinculados, y compara las aguas de la Tierra con el sistema circulatorio de un animal. El naturalista alemán Alexander von Humbolt, uno de los grandes pensadores unificadores de los siglos XVIII y XIX, llevó esta idea aún más lejos. Su «costumbre de ver el planeta como un todo» le llevó a identificar el clima con una fuerza global unificadora y a admitir la coevolución de organismos vivos, clima y corteza terrestre, lo que abarca casi en su totalidad a la presente hipótesis Gaia.[17]

A finales del siglo XVIII y principios del XIX, la influencia del movimiento romántico era tan fuerte que el problema de la forma biológica constituía el principal objetivo de los biólogos, mientras que los aspectos relativos a la composición material quedaban relegados a un plano secundario. Esto resulta especialmente cierto en las escuelas francesas de anatomía comparativa o «morfología» encabezadas por Georges Cuvier, quien creó un sistema de clasificación zoológica basado en las similitudes de las relaciones estructurales.[18]

EL MECANICISMO DEL SIGLO XIX

Durante la segunda mitad del siglo XIX, el péndulo retrocedió hacia el mecanicismo cuando el recientemente perfeccionado microscopio condujo a notables avances en biología.[19] El siglo xix es más conocido por el desarrollo del pensamiento evolucionista, pero también vio la formulación de la teoría celular, el principio de la moderna embriología, el ascenso de la microbiología y el descubrimiento de las leyes de la herencia genética. Estos nuevos descubrimientos anclaron firmemente la biología en la Tísica y la química y los científicos redoblaron sus esfuerzos en la búsqueda de explicaciones físico-químicas para la vida.

Cuando Rudolph Virchow formuló la teoría celular en su forma moderna, la atención de los biólogos se desplazó de los organismos a las células. Las funciones biológicas, más que reflejar la organización del organismo como un todo, se veían ahora como los resultados de las interacciones entre los componentes básicos celulares.

La investigación en microbiología -un nuevo campo que revelaba una riqueza y complejidad insospechadas de organismos vivos microscópicos- fue dominada por el genio de Louis Pasteur, cuyas penetrantes intuiciones y clara formulación causaron un Impacto perdurable en la química, la biología y la medicina. Pasteur fue capaz de establecer el papel de las bacterias en ciertos procesos químicos, poniendo así los cimientos de la nueva ciencia de la bioquímica, demostrando además la existencia de una definitiva relación entre «gérmenes» (microorganismos) y enfermedad.

los descubrimientos de Pasteur condujeron a una simplista «teoría de la enfermedad por gérmenes» en la que las bacterias se veían como la única causa de enfermedad. Esta visión reduccionista eclipso una teoría alternativa enseñada unos años antes por (Claude Bernard, fundador de la moderna medicina experimental.

Bernard insistía en la cercana e íntima relación entre un organismo y su enlomo y fue el primero en señalar que cada organismo posee también un entorno interior, en el que viven sus órganos y tejidos. Bernard observaba que en un organismo sano, este medio interior se mantiene básicamente constante, incluso cuando el entorno externo fluctúa considerablemente. Su concepto de la constancia del medio interior adelantaba la importante noción de homeostasis, desarrollada por Walter Cannon en los años veinte.

La nueva ciencia de la bioquímica mantenía su progreso y establecía entre los biólogos el firme convencimiento de que todas las propiedades y funciones de los organismos vivos podían eventualmente ser explicadas en los términos de las leyes de la física y la química. Esta creencia quedaba claramente explicitada en *La concepción mecanicista de la vicia* de Jacques Loeb, que tuvo una tremenda influencia en el pensamiento biológico de su época.

EL VITALISMO

Los triunfos de la biología del siglo xix -teoría celular, embriología y microbiología- establecieron la concepción mecanicista de la vida como un firme dogma entre los biólogos. No obstante, llevaban ya dentro de sí las semillas de la nueva ola de oposición, la escuela conocida como biología organicista o «organicismo». Mientras que la biología celular hacía enormes progresos en la comprensión de las estructuras y funciones de las subunidades celulares, permanecía en gran medida ignorante respecto a las actividades coordinadoras que integran dichas operaciones en el funcionamiento de la célula como un todo.

Las limitaciones del modelo reduccionista se evidenciaron aún más espectacularmente en el análisis del desarrollo y diferenciación celular. En los primeros estadios del desarrollo de los organismos superiores, el número de células se incrementa de una a dos, a cuatro, a ocho y así sucesivamente, doblándose a cada paso. Puesto que la información genética es idéntica para cada célula, ¿cómo pueden éstas especializarse en distintas vías, convirtiéndose en células musculares, sanguíneas, óseas, nerviosas, etc.? Este problema básico del desarrollo, que se repite bajo diversos aspectos en biología, desalía claramente la visión mecanicista de la vida.

Antes del nacimiento del organicismo, muchos destacados biólogos pasaron por una fase vilalista y durante muchos años el

debate entre mecanicismo y holismo dio paso a uno entre mecanicismo y vitalismo.[20] Una clara comprensión de la concepción vitalisla resulta muy útil, ya que contrasta agudamente con la visión sistémica de la vida que iba a emerger desde la biología organísmica en el siglo xx.

Tanto el vitalismo como el organicismo se oponen a la reducción de la biología a física y química. Ambas escuelas mantienen que, si bien las leyes de la física y la química se pueden aplicar a los organismos, resultan insuficientes para la plena comprensión del fenómeno de la vida. El comportamiento de un organismo como un todo integrado no puede ser comprendido únicamente desde el estudio de sus partes. Como la teoría de sistemas demostraría más adelante, el todo es más que la suma de sus partes.

Vitalistas y biólogos organicistas difieren agudamente en sus respuestas a la pregunta de en qué sentido exactamente el todo es más que la suma de sus partes. Los primeros aseguran que existe alguna entidad no física, alguna fuerza o campo, que debe sumarse a las leyes de la física y la química para la comprensión de la vida. Los segundos afirman que el ingrediente adicional es la comprensión de la «organización» o de las «relaciones organizadoras».

Puesto que dichas relaciones organizadoras son consustanciales a la estructura física del organismo, los biólogos organicistas niegan la necesidad de la existencia de cualquier entidad no física separada para la comprensión de la vida. Veremos más adelante cómo el concepto de organización ha sido refinado hasta el de «autoorganización» en las teorías contemporáneas de los sistemas vivos y cómo el patrón de autoorganización es la clave para la comprensión de la naturaleza esencial de la vida.

Mientras que los biólogos organicistas desafiaban la analogía mecanicista cartesiana tratando de comprender la forma biológica en términos de un más amplio significado de la organización, los vitalistas no iban en realidad más allá del paradigma cartesiano. Su lenguaje qLiedaba limitado por las mismas imágenes y metáforas; simplemente añadía una entidad no física como directora o diseñadora del proceso de organización que desafiaba las explicaciones mecanicistas. La división cartesiana entre mente y cuerpo guiaba pues por igual al mecanicismo y al vitalismo. Cuando los seguidores de Descartes excluían la mente de la biología y concebían el cuerpo como una máquina, el «fantasma en la máquina» -utilizando la frase de Arthur Koestler-[21] aparecía en las teorías vitalistas.

El embriólogo alemán Hans Driesch inició la oposición a la biología mecanicista a la vuelta del siglo con sus experimentos

pioneros con huevos de erizo marino, que le condujeron a formular la primera teoría del vitalismo. Cuando Driesch destruía una de las células de un embrión en el temprano estadio bicelular, la célula restante se desarrollaba no en medio erizo, sino en un organismo completo, simplemente más pequeño. De forma similar, organismos completos más pequeños se desarrollaban tras la destrucción de dos o tres células en la fase cuatricelular del embrión. Driesch comprendió que los huevos de erizo marino habían hecho lo que ninguna máquina sería capaz de hacer jamás: la regeneración de entes completos desde algunas de sus parles.

Para explicar el fenómeno de la autorregulación, Driesch parece haber buscado trabajosamente el patrón de organización perdido,[22] pero, en lugar de centrarse en el concepto de patrón, postuló un íactor causal, para el que escogió el término aristotélico *entelequia.* No obstante, mientras que la en*telequia* aristotélica es un proceso de autorrealización que unifica materia y forma, la *enteleqnia* postulada por Driesch sería una entidad separada que actúa sobre el sistema físico sin ser parte del mismo.

La idea vilalista ha sido revivida recientemente de modo mucho más sofisticado por Ruper Sheldrake, quien postula la existencia de campos no lisíeos o *morfogenéticos* («generadores de forma») como agentes causales del desarrollo y mantenimiento de la forma biológica.[23]

LA BIOLOGÍA ORGANICISTA

A principios del siglo XX los biólogos organicistas, en oposición al mecanicismo y al vitalismo, tomaron el problema de la forma biológica con nuevo entusiasmo, elaborando y redefiniendo muchos de los conceptos clave de Aristóteles, Goethe, Kant y Cuvier. Algunas de las principales características de lo que hoy llamamos pensamiento sistémico surgieron de sus extensas reflexiones.[24]

Ross Harrison, uno de los exponentes tempranos de la escuela organicista, exploró el concepto de organización, que había ido reemplazando gradualmente la vieja noción de función en fisiología. Este cambio de función a organización representó un desplazamiento del pensamiento mecanicista al sistémico, al ser la función un concepto esencialmente mecanicista. Harrison identificaba configuración y relación como dos aspectos de la

organización, unificados subsiguientemente en el concepto de patrón o pauta como la configuración de relaciones ordenadas.

El bioquímico Lawrence Henderson influenció con su temprano uso del término «sistema» para denominar organismos vivos y sistemas sociales.[25] A partir de aquel momento, «sistema» ha venido a definir un todo integrado cuyas propiedades esenciales surgen de las relaciones entre sus partes, y «pensamiento sistémico» la comprensión de un fenómeno en el contexto de un todo superior. Esta es, en efecto, la raíz de la palabra «sistema» que deriva del griego *synistánai* («reunir», «juntar», «colocar juntos»). Comprender las cosas sislémicamente significa literalmente colocarlas en un contexto, establecerla naturaleza de sus relaciones.[26]

El biólogo Joseph Woodger afirmaba que los organismos podrían ser descritos completamente en términos de sus elementos químicos «más sus relaciones organizadoras». Esta formulación tuvo una notable influencia en Joseph Needham, quien mantuvo que la publicación en 1936 de los *Principios biológicos* de Woodger marcó el fin del debate entre mecanicislas y vitalistas.[27] Needham, cuyos primeros trabajos fueron sobre lemas de bioquímica del desarrollo, estuvo siempre profundamente interesado en las dimensiones filosófica e histórica de la ciencia. Escribió múltiples ensayos en defensa del paradigma mecanicista, pero posteriormente cambió para abrazar el punto de vista organicista. «Un análisis lógico del concepto de organismo», escribía en 1935, «nos conduce a la búsqueda de relaciones organizadoras a todos los niveles, altos y bajos, bastos y sutiles, de la estructura viviente.»[28] Más tarde, Needham abandonaría la biología para convertirse en uno de los principales historiadores de la ciencia china y, como tal, en un ferviente defensor de la visión organicista que constituye la base del pensamiento chino.

Woodger y muchos otros subrayaron que una de las características clave de la organización de los organismos vivos era su naturalezajerárquica. Efectivamente, una de las propiedades sobresalientes de toda manifestación de vida es la tendencia a constituir estructuras multinivel de sistemas dentro de sistemas. Cada uno de ellos forma un todo con respecto a sus partes, siendo al mismo tiempo parle de un todo superior. Así las células se combinan para formar tejidos, éstos para formar óiganos y éstos a su vez para formar organismos. Éstos a su vez existen en el seno de sistemas sociales y ecosistemas. A través de todo el mundo viviente nos encontramos con sistemas vivos anidando dentro de otros sistemas vivos.

Desde los albores de la biología organicista estas estructuras multinivel han sido denominadas jerarquías. No obstante, este término puede resultar bastante equívoco al derivarse de las jerarquías humanas, estructuras éstas bastante rígidas, de dominación y control, y muy distintas del orden multinivel hallado en la naturaleza. Es conveniente observar que el importante concepto de red -la trama de la vida- provee una nueva perspectiva sobre las denominadas jerarquías de la naturaleza.

Algo que los primeros pensadores sistémicos admitieron muy claramente fué la existencia de diferentes niveles de complejidad con diferentes leves operando en cada nivel. En efecto, el concepto de «complejidad organizada» se convirtió en el protagonista del planteamiento sistémico.[29] A cada nivel de complejidad los fenómenos observados evidencian propiedades que no se dan en el nivel inferior. Por ejemplo, el concepto de temperatura, crucial en termodinámica, carece de sentido al nivel de átomos individuales, donde reinan las leyes de la teoría cuántica. Del mismo modo, el sabor del azúcar *no* está presente en los átomos de carbón, hidrógeno y oxígeno que lo constituyen. A principios de los años veinte, el filósofo C. D. Broad acuñó el término «propiedades emergentes» para estas propiedades que surgen a un cierto nivel de complejidad pero que no se dan en niveles inferiores.

EL PENSAMIENTO SISTÉMICO

Las ideas propuestas por los biólogos organicistas durante la primera mitad del siglo contribuyeron al nacimiento de una nueva manera de pensar-«pensamiento sistémico»- en términos de conectividad, relaciones y conlexto. Según la visión sistémica, las propiedades esenciales de un organismo o sistema viviente, son propiedades del todo que ninguna de las partes posee. Emergen de las interacciones y relaciones entre las partes. Estas propiedades son destruidas cuando el sistema es diseccionado, ya sea física o teóricamente, en elementos aislados. Si bien podemos discernir partes individuales en todo sistema, estas partes no están aisladas y la naturaleza del conjunto es siempre distinta de la mera suma de sus partes. La visión sistémica de la vida se halla abundante y hermosamente ilustrada en los escritos de Paul Weiss, quien aportó conceptos sistémicos a las ciencias de la vida desde sus anteriores estudios de ingeniería y dedicó su vida entera a explorar y defender una concepción completamente organicista de la biología.[30]

La aparición del pensamiento sistémico constituyó una profunda revolución en la historia del pensamiento científico occidental. La creencia de que en cada sistema complejo el comportamiento del todo puede entenderse completamente desde las propiedades de sus partes, es básico en el paradigma cartesiano. Este era el celebrado método analítico de Descartes, que ha cons------- una característica esencial del pensamiento de la ciencia moderna. En el planteamiento analítico o reduccionista, las parles mismas no pueden ser analizadas más allá, a no ser que las reduzcamos a partes aún más pequeñas. De hecho, la ciencia occidental ha ido avanzando así, encontrándose a cada paso con un nivel de componentes que no podían ser más analizados.

El gran shock para la ciencia del siglo xx ha sido la constatación de que los sistemas no pueden ser comprendidos por medio del análisis. Las propiedades de las partes no son propiedades inintrínsecas, sino que sólo pueden ser comprendidas en el contexto de un conjunto mayor. En consecuencia, la relación entre las parles y el todo ha quedado invertida. En el planteamiento sistémico las propiedades de las partes sólo se pueden comprender desde la organización del conjunto, por lo tanto, el pensamiento sistémico no se concentra en los componentes básicos, sino en los principios esenciales de organización. El pensamiento sistémico es «contextual», en contrapartida al analítico. Análisis significa aislar algo para estudiarlo y comprenderlo, mientras que el pensamiento sistémico encuadra este algo dentro del contexto de un todo superior.

LA FÍSICA CUÁNTICA

La constatación de que los sistemas son totalidades integradas que no pueden ser comprendidas desde el análisis fue aún más chocante en física que en biología. Desde Newton, los físicos habían pensado que todos los fenómenos físicos podían ser reducidos a las propiedades de sólidas y concretas partículas materiales. En los años veinte no obstante, la teoría cuántica les forzó a aceptar el hecho de que los objetos materiales sólidos de la física clásica se disuelven al nivel subatómico en pautas de probabilidades en forma de ondas. Estas pautas o patrones, además, no representan probabilidades de cosas, sino más bien de intercone-

xiones. Las partículas subatómicas carecen de significado como entidades aisladas y sólo pueden ser entendidas como interconexiones o correlaciones entre varios procesos de observación y medición. En otras palabras, las partículas subatómicas no son «cosas» sino interconexiones entre cosas y éstas, a su vez, son interconexiones entre otras cosas y así sucesivamente. En teoría cuántica nunca terminamos con «cosas», sino que constantemente tratamos con interconexiones.

Así es como la física cuántica pone en evidencia que no podemos descomponer el mundo en unidades elementales independientes. Al desplazar nuestra atención de objetos macroscópicos a átomos y partículas subatómicas, la naturaleza no nos muestra componentes aislados, sino que más bien se nos aparece como una compleja trama de relaciones entre las diversas partes de un todo unificado. Como dijera Werner Heisenberg, uno de los fundadores de la teoría cuántica: «El mundo aparece entonces como un complicado tejido de acontecimientos, en el que conexiones de distinta índole alternan o se superponen o se combinan, determinando así la textura del conjunto.»[31]

Átomos y moléculas -las estructuras descritas por la física cuántica- constan de componentes. No obstante, estos componentes -las partículas subatómicas- no pueden ser entendidos como entidades aisladas sino que deben ser definidas a través de sus interrelaciones. En palabras de Henry Stapp: «Una partícula elemental no es una entidad no analizable con existencia independiente. Es, en esencia, un conjunto de relaciones que se extienden hacia otras cosas.»[32]

En el formalismo de la teoría cuántica, estas relaciones se expresan en términos de probabilidades y éstas quedan determinadas por la dinámica de todo el sistema. Mientras que en la mecánica clásica las propiedades y el comportamiento de las partes determinan las del conjunto, en la mecánica cuántica la situación se invierte: es el todo el que determina el comportamiento de las partes.

Durante los años veinte, la física cuántica se debatió en el mismo cambio conceptual de las partes al todo que dio lugar a la escuela de la biología organicista. De hecho, probablemente los biólogos hubiesen encontrado mucho más difícil superar el mecanicismo cartesiano de no haberse colapsado éste tan espectacularmente como lo hizo en el campo de la física, en el que el paradigma cartesiano había imperado a lo largo de tres siglos. Heisenberg vio el cambio de las partes al todo corno el aspecto central de esa revolución conceptual y quedó tan impresionado por él que tituló su autobiografía *Der Teil und das Ganze* (La par-- v el todo).[33]

LA PSICOLOGÍA GESTALT

Mientras los primeros biólogos organicistas luchaban con el problema de la forma orgánica y debatían los méritos relativos al mecanicismo y al vitalismo, los psicólogos alemanes desde el principio contribuyeron al diálogo.[34] La palabra alemana para denominar la forma orgánica es *gestalt* (a diferencia de *form,* que denota aspecto inmanente) y el muy discutido tema de la forma orgánica era conocido como el *gestaltproblem* en aquellos tiempos. A la vuelta del siglo, el filósofo Christian von Ehrenfelds fue el primero en usar *gestalt* en el sentido de una pauta perceptual irreductible, sentido que impregnaba la escuela de psicología *Gestalt.* Ehrenfels caracterizaba la gestalt afirmando que el todo es más que la suma de las partes, lo que se convertiría en la fórmula clave de los pensadores sistémicos más adelante.[35]

Los psicólogos Gestalt, liderados por Max Wertheimer y Wolfgang Köhler, veían la existencia de lodos irreductibles como un aspecto clave de la percepción. Los organismos vivos, afirmaban, perciben no en términos de elementos ¿lisiados, sino de patrone perceptuales integrados, conjuntos organizados dotados de significado, que exhiben cualidades ausentes en sus partes. La noción de patrón estuvo siempre implícita en los escritos de los psicólogos Gestalt, quienes a menudo usaban la analogía de un lema musical que puede ser interpretado en diferentes tonos sin perder por ello sus prestaciones esenciales.

Como los biólogos organicistas, los psicólogos gestalt veían su escuela de pensamiento como una tercera vía más allá del mecanicismo y el vitalismo. La escuela Gestalt hizo contribuciones substanciales a la psicología, especialmente en el estudio y aprendizaje de la naturaleza de las asociaciones. Varias décadas después, ya en los sesenta, su planteamiento holístico de la psicología dio lugar a la correspondiente escuela de psicoterapia conocida como terapia Gestalt, que enfatiza la integración de las experiencias personales en conjuntos significativos.[36]

Durante la República de Weimar de la Alemania de los años veinte, tanto la biología organicista como la psicología Gestalt

formaron parte de una corriente intelectual mayor que se veía a sí misma como un movimiento de protesta contra la creciente fragmentación y alienación de la naturaleza humana. Toda la cultura Weimar se caracterizaba por su aspecto antimecanicista, por su «hambre de totalidad».[37] La biología organicista, la psicología Gestalt, la ecología y más adelante la teoría general de sistemas, surgieron de este holístico *zeitgeist.**

ECOLOGÍA

Mientras que los biólogos organicistas se encontraban con la totalidad irreductible en los organismos, los físicos cuánticos en los fenómenos atómicos y los psicólogos gestalt en la percepción, los ecólogos la hallaban en sus estudios de comunidades de animales y plantas. La nueva ciencia de la ecología emergió de la escuela organicista de biología durante el siglo xix, cuando los biólogos comenzaron a estudiar comunidades de organismos.

La ecología -del griego *oikos* («casa»)- es el estudio del Hogar Tierra. Más concretamente, es el estudio de las relaciones que vinculan a todos los miembros de este Hogar Tierra. El término fue acuñado en 1866 por el biólogo alemán Ernst Haeckel, quien la definió como «la ciencia de las relaciones entre el organismo y el mundo exterior que le rodea.»[38] En 1909 la palabra *umwelt* («entorno») fue utilizada por primera vez por el biólogo báltico y pionero ecológico Jakob von Uexküll.[39]

En los años veinte, los ecólogos centraban su atención en las relaciones funcionales en el seno de comunidades de animales y plantas.[40] En su libro pionero *Animal Ecology,* Charles Elton introducía los conceptos de cadenas y ciclos tróficos, contemplando las relaciones nutricionales como el principio organizador principal en el seno de las comunidades biológicas.

Puesto que el lenguaje utilizado por los primeros ecólogos no era muy distinto del de la biología organicista, no resulta sorprendente que comparasen comunidades biológicas con organismos. Por ejemplo, Frederic Clements, un ecólogo botánico americano pionero en el estudio de la sucesión, veía las comunidades de plantas como «superorganismos». Este concepto desencadenó un vivo debate, que se prolongó durante más de una década hasta que el ecólogo botánico británico A. G. Tansley refutó la noción de superorganismo y acuñó el término «ecosistema» para describir a las comunidades de animales y plantas. El concepto de ecosistema -definido hoy en día como «una comunidad de organismos y su entorno físico, interacluando como una unidad ecológica»-[41] conformó todo el pensamiento ecológico subsiguiente y promovió una aproximación sistémica a la ecología.

El término «biosfera» fue utilizado por primera vez a finales del siglo xix por el geólogo austríaco Eduard Suess para describir la capa de vida que rodea la Tierra. Unas décadas después, el geoquímico ruso Vladímir Vernadski desarrollaba el concepto hasta una completa teoría en su libro pionero titulado *Biosfera.*[42] Apoyándose en las ideas de Goethe, Humbolt y Suess, Vernadsky veía la vida como una «fuerza geológica» que en parte creaba y en parle controlaba el entorno planetario. De entre todas las teorías tempranas sobre la Tierra viviente, la de Vernadsky es la que más se acerca a la contemporánea teoría Gaia desarrollada por James Lovelock y Lynn Margulis en los años setenta.[43]

La nueva ciencia de la ecología enriqueció el emergente pensamiento sistémico introduciendo dos nuevos conceptos: comunidad y red. Al contemplar la comunidad ecológica como un conjunto de organismos ligados en un todo funcional por sus mutuas relaciones, los ecólogos facilitaron el cambio de atención de los organismos hacia las comunidades y en general, aplicando conceptos similares a distintos niveles de los sistemas.

Sabemos hoy que la mayoría de los organismos no sólo son miembros de comunidades ecológicas, sino que son también complejos ecosistemas en sí mismos, conteniendo huestes de organismos más pequeños dotados de considerable autonomía, pero inlegrados armoniosamente en un todo funcional. Hay pues tres rlases de sistemas vivos: organismos, partes de organismos y comunidades de organismos; todos ellos totalidades integradas cuyas propiedades esenciales surgen de las interacciones e interdependencia de sus partes.

A lo largo de miles de millones de años de evolución, múltiples especies han ido tejiendo comunidades tan estrechas que el sistema se asemeja a un enorme, multicriatural organismo.[44] Abejas y hormigas, por ejemplo, son incapaces de sobrevivir aisladamente pero en masa, actúan casi como las células de un complejo organismo dotado de inteligencia colectiva y capacidad de

* En alemán en el original: *zeitgeist,* espíritu de un tiempo, inteligencia compartida en una determinada época. *(N. del T.)*

adaptación muy superior a las de sus miembros individuales. Una estrecha coordinación de actividades similar se da en la simbiosis entre distintas especies, donde de nuevo los sistemas resultantes tienen las características de un organismo único.[43]

Desde los principios de la ecología, las comunidades ecológicas fueron concebidas como entidades constituidas por organismos vinculados por redes a través de relaciones nutricionales. Esta idea se repite en los escritos de los naturalistas del siglo xix y cuando las cadenas alimentarias y los ciclos tróficos empiezan a ser estudiados en los años veinte, estas nociones se expanden rápidamente hasta el concepto contemporáneo de redes de alimento.

La «trama de la vida» es, desde luego, una antigua idea que ha sido utilizada por poetas, filósofos y místicos a través de los tiempos para comunicar su percepción del entretejido y la interdependencia de todos los fenómenos. Una de sus más bellas expresiones se encuentra en el discurso atribuido al Jefe Seattle, que constituye el *motto* de este libro.

A medida que el concepto de red fue adquiriendo mayor relevancia en ecología, los pensadores sistémicos empezaron a aplicar los modelos de redes a todos los niveles sistémicos, contemplando a los organismos como redes de células, órganos y sistemas de órganos, al igual que los ecosistemas son entendidos como redes de organismos individuales. Consecuentemente, los flujos de materia y energía a través de los ecosistemas se perciben como la continuación de las vías metabólicas a través de los organismos.

La visión de los sistemas vivos como redes proporciona una nueva perspectiva sobre las llamadas jerarquías de la naturaleza.[46] Puesto que los sistemas vivos son redes a todos los niveles, debemos visualizar la trama de la vida como sistemas vivos (redes) interactuando en forma de red con otros sistemas (redes). Por ejemplo, podemos representar esquemáticamente un ecosistema como una red con unos cuantos nodos. Cada nodo representa un organismo y ampliado aparecerá como otra red. Cada nodo en la nueva red representará un órgano, que a su vez aparecerá como una red al ser ampliado y así sucesivamente.

En otras palabras, la trama de la vida está constituida por redes dentro de redes. En cada escala y bajo un escrutinio más cercano, los nodos de una red se revelan como redes más pequeñas. Tendemos a organizar estos sistemas, todos ellos anidando en sistemas mayores, en un esquema jerárquico situando los mayores por encima de los menores a modo de pirámide invertida,

pero esto no es más que una proyección humana. En la naturaleza no hay un «arriba» ni un «abajo» ni se dan jerarquías. Sólo hay redes dentro de redes.

Durante las últimas décadas la perspectiva de redes se ha Vuelto cada vez más importante en ecología. Como dijo el ecólogo Bernard Patten en sus conclusiones finales en una reciente conferencia sobre redes ecológicas: «La ecología *es* redes... Comprender los ecosistemas será en definitiva comprender las redes.»[47] Efectivamente, en la segunda mitad del siglo el concepto de red ha sido clave para los recientes avances en la comprensión científica, no sólo de los ecosistemas, sino de la misma naturaleza de la vida.

En los años treinta, la mayoría de los criterios clave del pensamiento sistémico habían sido ya formulados por los biólogos organieistas, los psicólogos de la Gestalt y los ecólogos. En lodos estos campos, el estudio de los sistemas vivos -organismos, partes de organismos y comunidades de organismos- había conducido a los científicos a la misma nueva manera de pensar en términos de conectividad. relaciones y contexto. Este nuevo pensamiento se veía además reforzado por los descubrimientos revolucionarios de la física cuántica en el reino de los átomos y las partículas subatómicas.

LOS CRITERIOS DEL PENSAMIENTO SISTÉMICO

Vale quizás la pena en este punto resumir las características esenciales del pensamiento sistémico. El primer y más general criterio es el cambio de las partes al todo. Los sistemas vivos son totalidades integradas cuyas propiedades no pueden ser reducidas a las de sus partes más pequeñas. Sus propiedades esenciales o «sistémicas» son propiedades del conjunto, que ninguna de las partes tiene por sí sola. Emergen de las «relaciones organizadoras» entre las partes, es decir, de la configuración de relaciones ordenadas que caracteriza aquella clase específica de organismos o sistemas. Las propiedades sistémicas quedan destruidas cuando el sistema se disecciona en elementos aislados.

Otro criterio básico del pensamiento sistémico sería la habilidad para focalizar la atención alternativamente en distintos niveles sistémicos. A través del mundo viviente nos encontramos con sistemas dentro de sistemas. Mediante la aplicación de los mismos conceptos a los distintos niveles de sistemas -por ejemplo, el concepto de estrés en un organismo, una ciudad o una economía-, podemos obtener a menudo importantes percepciones. Por otro lado, cabe admitir también que, en general, a distintos nive-sistémicos corresponden distintos niveles de complejidad. En cada nivel, los fenómenos observados poseen propiedades que no se dan a niveles inferiores. Las propiedades sistémicas de un nivel concreto reciben el nombre de propiedades «emergentes», puesto que emergen precisamente en aquel nivel.

En el cambio del pensamiento mecanicista al pensamiento sistémico, la relación entre las partes y el todo queda invertida. La ciencia cartesiana creía que en todo sistema complejo el comportamiento del conjunto podía ser analizado en términos de las propiedades de sus partes. La ciencia sistémica demuestra que los sistemas vivos no pueden ser comprendidos desde el análisis. Las propiedades de las partes no son propiedades intrínsecas y sólo pueden entenderse desde el conlexto del todo mayor. Por tanto, el pensamiento sistémico es un pensamiento «contextual», y puesto[4] que la explicación en términos de contexto significa la explicación en términos de entorno, podemos también afirmar que el pensamiento sistémico es un pensamiento medioambiental.

En última instancia -como la física cuántica demostró tan espec lacularmenle- no hay partes en absoluto. Lo que denominamos parte, es meramente un patrón dentro de una inseparable red de relaciones. Por tanto, el cambio de las partes al todo puede también ser contemplado como el cambio de objetos a relaciones. En cierto modo, se trata de un cambio de esquemas, de diagramas. En la visión mecanicista el mundo es una colección de objetos. Éstos, por supuesto, interactúan y aquí y allá aparecen relaciones entre ellos, pero éstas son secundarias, como ilustra esquemáticamente la figura 3-1 A. En la visión sistémica vemos que los objetos en sí mismos son redes de relaciones inmersas en redes mayores. Para el pensador sistémico las relaciones son prioritarias. Las fronteras entre patrones discernibles («objetos») son secundarias, como ilustra, también de modo muy simplificado, la figura 3-1 B.

La percepción del mundo viviente como una red de relaciones ha convertido el pensamiento en términos de redes -expresado más elegantemente en alemán como *vernetzes Denken*- en otra de las características fundamentales del pensamiento sistémico. Este «pensamiento en redes» ha influenciado, no sólo nuestra visión de la naturaleza, sino también el modo en el que hablamos del conocimiento científico. Durante milenios, los científicos y filósofos occidentales han usado la metáfora del conocimiento

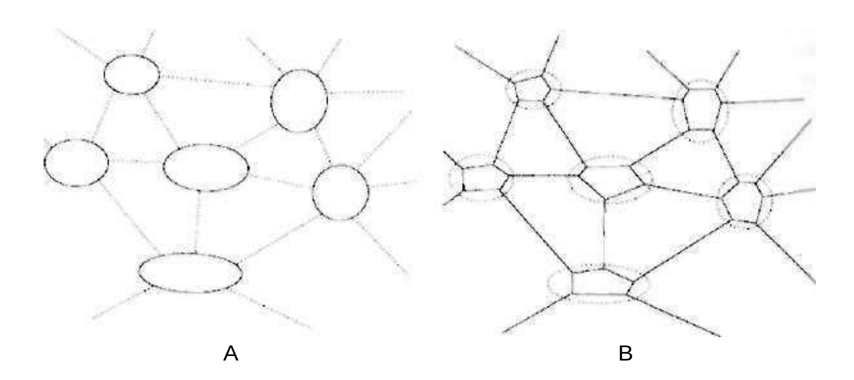


Figura 3-1
El cambio de esquemas de objetos a relaciones.

como un edificio, junto con muchas otras metáforas arquitectónicas derivadas de la primera.[1] Hablamos de leyes *fundamentales,* principios *fundamentales,* componentes *básicos* y demás, afirmando que el *edificio* de la ciencia debe ser *construido* sobre firmes *cimientos.* Cada vez que se producía una revolución científica mayor, se veían temblar los cimientos de la ciencia. Descartes escribía en su *Discurso del método:*

> Mientras que las [ciencias] tomen prestados sus principios a la filosofía, considero que nada sólido podrá ser edificado sobre tan inestables cimientos.[2]

Trescientos años más tarde, Heisenberg escribía en su *Física y filosofía* que los cimientos de la física clásica, es decir del propio edificio construido por Descartes, temblaban:

> La violenta reacción ante el reciente desarrollo de la física moderna, sólo puede entenderse desde la percepción de que los mismos cimientos de la física han empezado a moverse y que este movimiento ha provocado la sensación de que el suelo va a desaparecer bajo los pies de la ciencia.[3]

En su autobiografía, Einslein describe sus sensaciones en términos muy similares a los de Heisenberg:

> Fue como si la tierra hubiese desaparecido bajo nuestros pies, sin tener ningún cimiento firme a la vista sobre el que poder construir.[4]

En el el nuevo pensamiento sistémico, la metáfora del conocimiento como construcción queda reemplazada por la de la red. Al percibir la realidad como una red de relaciones, nuestras descripciones forman también una red interconectada de conceptos y modelos en la que no existen cimientos. Para la mayoría de científicos, esta visión del conocimiento como red sin cimientos firmes resulta aún sumamente inquietante. Pero, a medida que el planteamiento de red se expanda por la comunidad científica, la idea del conocimiento como red encontrará sin duda una creciente aceptación.

La noción de conocimiento científico como red de conceptos y modelos, en la que no hay partes más fundamentales que otras, fue formalizada en física por Geoffrey Chew en su *filosofía bootstrap** en los años setenta.[5] Esta filosofía no sólo abandona la idea de componentes básicos de materia, sino que refuta cualquier tipo de entidades fundamentales, no aceptando ninguna constante, ley o ecuación fundamental. El universo material es visto como una red dinámica de acontecimientos interrelacionados. Ninguna de las propiedades de ninguna parte de la red es fundamental; todas se derivan de las propiedades de las demás partes y la consistencia total de sus interrelaciones determina la estructura de toda la red.

Cuando este planteamiento es aplicado a la ciencia como un todo, ello implica que la física ya no se puede considerar como el nivel más fundamental de la ciencia. Los fenómenos descritos por la física ya no son más importantes que los descritos por la biología o la psicología, por ejemplo. Pertenecen a distintos niveles sistémicos pero ninguno de ellos es más fundamental que otro.

Otra implicación importante de la visión de la realidad como una red inseparable de relaciones, aíecta al concepto tradicional de la objetividad científica. En el paradigma científico cartesiano, las descripciones son consideradas objetivas, es decir, independientes del observador humano y del proceso de conocimiento. El nuevo paradigma implica qué la epistemología -la comprensión del proceso de conocimiento- debe ser incluida explícitamente en la descripción de los fenómenos naturales.

Este reconocimiento entra en la ciencia de la mano de Werner Heisenberg y está íntimamente relacionado con la visión de la

* Para mayor clarificación sobre este punto, ver nota del traductor en capítulo 5. *(N. del T.)*

realidad Tísica como una red de relaciones. Si imaginamos la red reflejada en la figura 3-1B como mucho más intrincada, quizás parecida de algún modo a la mancha de tinta del test de Rorschach, podemos comprender fácilmente que aislar un patrón dentro de esta compleja red dibujando una frontera aleatoria a su alrededor y denominarlo un «objeto» resulta un tanto arbitrario.

Efectivamente, esto es lo que sucede cuando nos referimos a objetos de nuestro entorno. Por ejemplo, cuando vemos una red de relaciones entre hojas, ramitas, ramas y tronco, la denominamos «árbol». Al dibujar un árbol, la mayoría de nosotros olvidará las raíces, si bien éstas son a menudo tanto o más extensas que las partes del árbol que vemos. En un bosque, además, las raíces de todos sus árboles están entremezcladas, formando una densa red subterránea en la que no existen fronteras precisas entre árboles individuales.

Dicho brevemente, lo que denominamos árbol depende de nuestras percepciones. Depende, como decimos en ciencia, de nuestro método, de nuestra observación y de nuestras mediciones. En palabras de Heisenberg: «Lo que observamos, no es la naturaleza en sí misma, sino la naturaleza expuesta a nuestro método de observación.»[6] Así pues, el pensamiento sistémico comporta un cambio de ciencia objetiva a ciencia «epistémica», a un marco en el que la epistemología -«el método de cuestionar»- se convierte en parte integrante de las teorías científicas.

Los criterios del pensamiento sistémico descritos en este breve sumario son interdependientes. La naturaleza es percibida como una red interconectada de relaciones, en la que la identificación de patrones específicos como «objetos» depende del observador humano y del proceso de conocimiento. Esta red de relaciones es descrita en términos de su correspondiente red de conceptos y modelos, ninguno de los cuales es más lundamental que otro.

Esta novedosa aproximación a la ciencia plantea de inmediato una importante cuestión. Si todo está conectado con todo, ¿cómo podemos esperar comprender algo jamás? Puesto que todos los fenómenos están interconectados, para explicar cualquiera de ellos precisaremos comprender todos los demás, lo que obviamente resulta imposible.

Lo que convierte el planteamiento sistémico en una ciencia es el descubrimiento de que existe el conocimiento aproximado. Esta percepción resulta crucial para la totalidad de la ciencia moderna. El viejo paradigma se basa en la creencia cartesiana de la

certitud del conocimiento científico. En el nuevo paradigma se admite que lodos los conceptos y teorías científicas son limitados y aproximados; la ciencia nunca puede facilitar una comprensión completa y definitiva.

Esto se puede ilustrar fácilmente con un simple experimento que se efectúa frecuentemente en cursos introductorios de física, l'.l profesor deja caer un objeto desde una determinada altura y muestra a sus alumnos con una simple fórmula de física newtoniana cómo calcular el tiempo que tarda el objeto en llegar al suelo. Como en la mayoría de la física newtoniana, los cálculos despreciarán la resistencia del aire y no serán por tanto exactos. Efectivamente, si el objeto fuese una pluma de ave, el experimento simplemente no funcionaría.

El profesor puede darse por satisfecho con esta «primera aproximación» o puede avanzar un paso y tomar en consideración la resistencia del aire, introduciendo más datos en la fórmula. El resultado -la segunda aproximación- será más ajustado que el primero, pero no será aún exacto, ya que la resistencia del Aire depende de su temperatura y presión. Si el profesor es realmente ambicioso, propondrá una nueva fórmula, mucho más complicada, que tendrá en cuenta estas variables y dará como resultado una tercera aproximación.

No obstante, la resistencia del aire depende no sólo de su temperatura y presión, sino también de la convección, es decir, de la circulación de las partículas de aire a gran escala dentro de la habitación. Los alumnos podrán observar que esta convección puede estar influida por una ventana abierta, por sus patrones de respiración, etc. Llegado a este punto, el profesor detendrá probablemente el proceso de mejora de las aproximaciones por pasos sucesivos.

Este sencillo ejemplo demuestra cómo la caída de un objeto está conectada de múltiples maneras a su entorno y en última instancia al resto del universo. No importa cuántas conexiones lomemos en consideración para describir un fenómeno, siempre estaremos obligados a excluir otras. Por tanto, los científicos jamás pueden tratar con la verdad, en el sentido de una correspondencia precisa entre la descripción y el fenómeno descrito. En ciencia tratamos siempre con descripciones aproximadas de la realidad. Esto puede parecer frustrante, pero para los pensadores sistémicos el hecho de que podamos obtener un conocimiento aproximado sobre una red infinita de patrones interconectados es una fuente de confianza y fortaleza. Louis Pasteur lo expuso magníficamente:

> La ciencia avanza a través de respuestas tentativas hacia una serie de cuestiones más y más sutiles, que alcanzan más y más profundidad en la esencia de los fenómenos naturales.[7]

PENSAMIENTO PROCESAL

Todos los conceptos sistémicos discutidos hasta este punto pueden ser vistos como diferentes aspectos de una gran rama del pensamiento sistémico, que podríamos denominar pensamiento contextual. Hay otra rama de igual importancia que de algún modo surge en la ciencia de finales del siglo xx. Esta segunda rama es el pensamiento procesal. En el marco mecanicista de la ciencia cartesiana hay estructuras fundamentales y luego hay iuerzas y mecanismos a través de los cuales éstas interactúan, dando lugar a los procesos. En la ciencia sistémica cada estructura es vista como la manifestación de procesos subyacentes. El pensamiento sistémico siempre es pensamiento procesal.

En el desarrollo del pensamiento sistémico durante la primera mitad del siglo, el aspecto procesal fue enfatizado por primera vez por el biólogo austríaco Ludwig von Bertalanffy a finales de los años treinta y explorado en mayor escala en la cibernética de los años cuarenta. Una vez que los cibernéticos hubieron convertido los circuitos de retroalimentación y otros patrones dinámicos en el sujeto central de sus investigaciones científicas, los ecólogos empezaron a estudiar los flujos cíclicos de materia y energía a través de los ecosistemas. El texto *Ecología: bases científicas para un nuevo paradigma* de Eugene Odum por ejemplo, que influenció a toda una generación de ecólogos, describe los ecosistemas en términos de simples diagramas de flujos.[8]

Por supuesto, al igual que el pensamiento sistémico, el pensamiento procesal ha tenido sus precursores, incluso en la Grecia antigua. Efectivamente, en el alba de la ciencia occidental nos encontramos con el célebre dicho de Heráclito: «Todo fluye.» Durante los años veinte, el matemático y filósofo inglés Alfred Norlh Whitehead formulaba una filosofía básicamente orientada hacia el proceso.[9] En la misma época el fisiólogo Walter Cannon retomaba de Claude Bernard el principio de constancia del «medio interno» de un organismo y lo matizaba hasta llegar al concepto de homeostasis: el mecanismo autorregulador que permite a los organismos mantenerse en un estado de equilibrio dinámico con sus variables fluctuando dentro de límites de tolerancia.[10]

Mientras tanto, detallados estudios experimentales sobre las células dejaban claro que el metabolismo de la célula viva combina orden y actividad de un modo que no puede ser descrito por la ciencia mecanicista. Involucra miles de reacciones químicas, que se producen simultáneamente para transformar los nutrientes de la célula, sintetizar sus estructuras básicas y eliminar los producios de desecho. El metabolismo es una actividad continua, compleja y altamente organizada.

La filosofía procesal de Whitehead, el concepto de homeostasis de Cannon y el trabajo experimental sobre metabolismo, ejercieron una fuerte influencia sobre Ludwig von Bertalanffy, llevándole a la formulación de una nueva teoría de los «sistemas abiertos». Más tarde, durante los años cuarenta, Bertalanffy amplió su marco intentando combinar los distintos conceptos del pensamiento sistémico y de la biología organicista en una teoría formal de los sistemas vivos.

TEKTOLOGÍA

Normalmente se adjudica a Ludwig von Bertalanffy la primera formulación de un marco teórico comprensible para describir los principios de organización de los sistemas vivos. Sin embargo, veinte o treinta años antes de que publicase sus primeros escritos sobre su «teoría general de los sistemas», Alexander Bogdanov, médico, investigador, filósofo y economista ruso, desarrolló una teoría de sistemas de igual sofisticación y alcance que, desafortunadamente, es aún muy poco conocida fuera de Rusia.''

Bogdanov llamó a su teoría «tektología», del griego *tekton* («constructor»), lo que podría ser traducido como «la ciencia de las estructuras». El objetivo principal de Bogdanov era clarificar v generalizar los principios de organización de todas las estructuras vivientes y no vivientes:

> La tektología deberá clarificar los modos de organización que parecen existir en la actividad natural y humana; luego deberá generalizar y sistematizar estos modos; más adelante deberá explicarlos, es decir, proponer esquemas abstractos de sus tendencias y leyes... La tektología trata de las experiencias organizadoras, no de este o aquel campo especializado, sino de todos ellos en conjunto. En otras palabras, abarca la materia protagonista de todas las otras ciencias.[12]

La tektología constituyó el primer intento en la historia de la ciencia de llegar a una formulación sistémica de los principios de organización operantes en los sistemas vivos y no vivos.[13] Anticipó el marco conceptual de la teoría general de sistemas de Ludwig von Bertalanífy, incluyendo además varias ideas importantes que fueron formuladas cuatro décadas más tarde, en distinto lenguaje, como principios clave de la cibernética de Norbert Wiener y Ross Ashby.[14]

El objetivo de Bogdanov era formular una «ciencia universal de la organización». Definía la forma organizadora como la «totalidad de conexiones entre elementos sistémicos», lo que resulta virtualmente idéntico a nuestra definición contemporánea de patrón de organización.[15] Intercambiando los términos «complejo» y «sistema», Bogdanov distinguía tres clases de sistemas: complejos organizados, donde el todo es mayor que la suma de sus partes; complejos desorganizados, donde el todo es menor que la suma de sus partes, y complejos neutros, donde las actividades organizadoras y desorganizadoras se cancelan mutuamente.

La estabilidad y desarrollo de todo sistema pueden ser comprendidos, según Bogdanov, en términos de dos mecanismos organizadores básicos: formación y regulación. Estudiando ambas formas de dinámica organizadora e ilustrándolas con numerosos ejemplos de sistemas naturales y sociales, Bogdanov explora varias ideas clave seguidas por los biólogos organicistas y por los cibernéticos.

La dinámica de formación consiste en la conjunción de complejos a través de varios tipos de vínculos, que Bogdanov analiza con gran detalle. Enfatiza en particular que la tensión entre crisis y transformación es crucial en la formación de sistemas complejos. Adelantándose al trabajo de Ilva Prigogine,[16] Bogdanov demuestra cómo la crisis organizadora se manifiesta como un colapso del equilibrio sistémico existente, representando al mismo tiempo una transición organizadora hacia un nuevo estado de equilibrio. Al definirlas categorías de crisis, Bogdanov llega incluso a anticipar el concepto de catástrofe desarrollado por el matemático francés René Thom, que es un ingrediente clave de las actualmente emergentes nuevas matemáticas de la complejidad.[17]

Al igual que Bertalanffy, Bogdanov reconoce que los sistemas vivos son sistemas abiertos que operan lejos del equilibrio y estudia cuidadosamente sus procesos de regulación y autorregulación. Un sistema que no precisa de regulación externa ya que se autorregula, es el denominado «birregulador» en el lenguaje de

Bogdanov. Utilizando el ejemplo del motor a vapor, como harían los cibernéticos varias décadas después, Bogdanov describe esencialmente el mecanismo definido como retroalimentación* por Norbert Wiener, concepto que sería básico para la cibernética.[18]

Bogdanov no intentó formular sus ideas matemáticamente, pero contempló el futuro desarrollo de un «simbolismo tektónico» abstracto, una nueva clase de matemáticas capaces de analizar las pautas de organización que había descubierto. Medio siglo después, tales matemáticas han emergido ciertamente.[19]

Tektología, el libro pionero de\Bogdanov) fue publicado en Rusia en tres volúmenes entre 1912 *y* 1917. Una edición alemana fue publicada y ampliamente revisada en 1928. No obstante, se conoce muy poco en Occidente sobre esta primera versión de una teoría general de los sistemas, precursora de la cibernética. Incluso en la *Teoría general de sistemas* de Ludwig von Bertalanfíy, publicada en 1968 y que incluye una sección dedicada a la historia de la teoría de sistemas, no se encuentra mención alguna de la obra de Bogdanov. Cuesta entender cómo Bertalanffy, que publicaba todos sus trabajos originales en alemán y leía muchísimo en este idioma, no dio con la obra de Bogdanov.[20]

Bogdanov fue ampliamente malentendido entre sus contemporáneos debido ai gran adelanto sobre su tiempo de sus planteamientos. En palabras del científico azerbaijaní A. L. Takhtadzhian: «Extraña en su universalidad al pensamiento científíico de su tiempo, la idea de una teoría general de la organización fue entendida sólo por un puñado de hombres y por consiguiente no se expandió.»[21]

Los filósofos marxistas de la época de Bogdanov eran hostiles a sus ideas ya que concebían la tektología como un nuevo sistema filosófico diseñado para reemplazar al de Marx, a pesar de las repetidas protestas de Bogdanov por la confusión de su ciencia universal de la organización con una corriente íilosófica. Lenin atacó despiadadamente a Bogdanov como filósofo y en consecuencia sus obras estuvieron prohibidas durante casi medio siglo en la Unión Soviética. Recientemente, no obstante, y de resultas de la perestroika de Gorbachov, los escritos de Bogdanov han recibido gran atención por parte de los científicos y filósofos rusos. Cabe esperar, por tanto, que el trabajo pionero de Bogdanov sea reconocido más ampliamente también fuera de Rusia.

* En el original *feedback. (N. del T.)*

Antes de los años cuarenta los términos «sistema» y «pensamiento sistémico» habían sido utilizados ya por varios científicos, pero fueron los conceptos de Bertalanffy del sistema abierto y la teoría general de sistemas los que establecieron el pensamiento sistémico como movimiento científico mayor.[22] Con el subsiguiente firme apoyo de la cibernética, los conceptos de pensamiento sistémico y teoría de sistemas se convirtieron en partes integrantes del lenguaje científico establecido y condujeron a numerosas nuevas metodologías y aplicaciones: ingeniería sistémica, análisis de sistemas, dinámica sistémica, etc.[23]

Ludwig von Bertalanffy empezó su carrera como biólogo en la Viena de los años veinte. Pronto se unió a un grupo de científicos y filósofos conocido internacionalmente como el Círculo de Viena y su trabajo incluyó desde sus inicios amplios temas filosóficos.[24] Al igual que otros biólogos organicistas, creía firmemente que los fenómenos biológicos requerían nuevas formas de pensar, trascendiendo los métodos tradicionales de las ciencias físicas. Se dispuso a reemplazar los fundamentos mecanicistas de la ciencia por una visión holística:

> La teoría general de sistemas es una ciencia general de «totalidad», concepto que hasta ahora ha sido considerado vago, confuso y semimetafísico. En forma elaborada sería una disciplina matemática puramente formal en sí misma, pero aplicable a las diversas ciencias empíricas. Para las ciencias relacionadas con «totalidades organizadas» tendría semejante significación, como la teoría de probabilidades para las ciencias relacionadas con «sucesos aleatorios».[25]

A pesar de esta visión de una futura teoría matemática formal, Bertalanffy intentaba establecer su teoría general de sistemas sobre una sólida base biológica. Se oponía a la posición dominante de la física dentro de la ciencia moderna y enfatizaba la diferencia crucial entre sistemas físicos y biológicos.

Para defender su postura, Bertalanffy ponía el dedo en la llaga del dilema que había desafiado a los científicos desde el siglo XIX, cuando la novedosa idea de la evolución había irrumpido en el pensamiento científico. Mientras que la mecánica newtoniana era una ciencia de fuerzas y trayectorias, el pensamiento evolucionista -pensamiento en términos de cambio, crecimiento y desarrollo requería una nueva ciencia de la complejidad.[26] La primera formulación de esta nueva ciencia fue la termodinámica clásica con su celebrada «segunda ley», la ley de la disipación de la energía.[27] De acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, formulada primero por el físico francés Sadi Carnot en términos de tecnología para motores térmicos, hay una tendencia en los fenómenos físicos desde el orden hacia el desorden. Todo sistema físico aislado o «cerrado» procederá espontáneamente en la dirección de un creciente desorden.

Para expresar en términos matemáticos precisos esta dirección en la evolución de los sistemas físicos, los físicos introdujeron una nueva medida que llamaron «entropía».[28] según la segunda ley, la entropía de un sistema físico cerrado irá incrementándose, y dado que esta evolución viene acompañada de desorden creciente, la entropía puede ser también considerada como una medida de desorden.

Con el concepto de entropía y la formulación de la segunda ley, la termodinámica introducía la idea de procesos irreversibles, de un «vector de tiempo», en la ciencia. Según la segunda ley, alguna energía mecánica queda siempre disipada en forma de calor y no puede ser recuperada por completo. Así pues, el mundo-máquina estaría inmerso en un proceso de agotamiento que le llevaría irremisiblemente a un punto final.

Esta sórdida imagen de la evolución cósmica contrastaba completamente con el pensamiento evolucionista compartido por los biólogos del siglo xix, quienes observaban que el universo viviente evolucionaba del desorden al orden, hacia estados de creciente complejidad. Así pues, al final del siglo xix, la mecánica newtoniana, la ciencia de las eternas trayectorias reversibles, había sido reemplazada por dos visiones del cambio evolutivo diametralmente opuestas: la de un mundo vivo desplegándose hacia un creciente orden y complejidad y la de un motor en agotamiento, un mundo en creciente desorden. ¿Quién tenía razón, Darwin o Carnot?

Ludwig von Bertalanffy no podía resolver este dilema, pero dio el primer paso crucial al afirmar que los organismos vivos son organismos abiertos que no pueden ser descritos por la termodinámica clásica. Los llamó «abiertos» porque, para seguir vivos, necesitan alimentarse de un flujo continuo de materia y energía proveniente de su entorno:

> El organismo no es un sistema estático cerrado al exterior, conteniendo siempre los mismos elementos; es un sistema abier-

lo en un estado (cuasi)estable... en el que la materia continuamente entra desde, y sale hacia, el medio exterior.[29]

A diferencia de los sistemas cerrados, que se instalan en un estado de equilibrio térmico, los sistemas abiertos se mantienen lejos del equilibrio en este estado «estable» caracterizado por un continuo flujo y cambio. Bertalanffy acuñó el término alemán *fliessgleichgewicht* («equilibrio fluyente») para describir este estado de equilibrio dinámico. Vio claramente que la termodinámica clásica, que trata de sistemas cerrados en o cerca del estado de equilibrio, resultaba inadecuada para describir sistemas abiertos en estados estables lejos del equilibrio.

En los sistemas abiertos, especulaba Bertalanffy, la entropía (o desorden) puede decrecer y la segunda ley de la termodinámica puede no ser de aplicación. Postulaba que la ciencia clásica debería ser complementada por alguna nueva termodinámica de sistemas abiertos. No obstante, en los años cuarenta las técnicas matemáticas necesarias para semejante expansión de la termodinámica no estaban a disposición de Bertalanffy. La formulación de la nueva termodinámica de sistemas abiertos debería esperar hasta los años setenta. Éste fue el gran logro de Ilya Prigogine, quien usó unas nuevas matemáticas para reevaluar la segunda ley, repensando radicalmente los conceptos científicos tradicionales de orden y desorden, lo que le permitió resolver sin ambigüedades la contradicción entre las dos visiones de la evolución del siglo xix.[30]

Bertalanffy identificó correctamente las características del estado estable con las del proceso del metabolismo, lo que le llevó a postular la autorregulación como otra propiedad clave de los sistemas abiertos. Esta idea fue rcdeíinida por Prigogine treinta años después en términos de la autorregulación de las «estructuras disipativas».[31]

La visión de Ludwig von Bertalaniíy sobre una «ciencia general de la totalidad» se basaba en su observación de que los conceptos y principios sistémicos podían ser de aplicación en distintos campos de estudio: «El paralelismo de conceptos generales o incluso de leyes específicas en distintos campos», explicaba, «es consecuencia del hecho de que éstos están relacionados con "sistemas" y que ciertos principios generales son de aplicación a los sistemas con independencia de su naturaleza.»[32] Puesto que los sistemas vivos abarcan un espectro tan amplio de fenómenos, involucrando organismos individuales y sus partes, sistemas sociales y ecosistemas, Bertalanffy creía que la teoría general de sistemas podría ofrecer un marco conceptual idóneo para la unificación de diversas disciplinas científicas que habían quedado aisladas y fragmentadas:

> «La teoría general de sistemas debería ser (...) un medio importante para controlar y potenciar la transferencia de principios entre campos, no siendo ya necesario duplicar o triplicar el descubrimiento del mismo principio en distintos campos aislados entre sí. Al mismo tiempo, al formular criterios exactos, la teoría general de sistemas se establecería como defensa contra analogías superficiales sin utilidad para la ciencia.[33]

Bertalanffy no llegó a ver la materialización de esta visión y quizás no haya sido nunca formulada una ciencia general de la totalidad. No obstante, durante las dos décadas siguientes a su muerte en 1972, empezó a surgir una concepción sistémica de vida, mente y consciencia que trasciende las fronteras disciplinarias y que, efectivamente, ofrece la posibilidad de unificar campos hasta ahora separados. Si bien esta concepción tiene sus raíces más bien en la cibernética que en la teoría general de sistemas, debe ciertamente mucho a las ideas y conceptos que Ludwig von Bertalanffy introdujera en la ciencia.

Mientras Ludwig von Bertalanfíy trabajaba en su teoría general de sistemas, los intentos de desarrollar máquinas autoconducidas y autorreguladas llevaban a un campo de investigación enteramente nuevo, llamado a tener un impacto de la mayor importancia en la expansión de la visión sistémica de la vida. Nutriéndose de diversas disciplinas, la nueva ciencia representaba un enfoque unificado de los problemas de comunicación y control, involucrando todo un conjunto de ideas novedosas que inspiró a Norbert Wiener a inventar para ella un nombre específico: «cibernética». Esta palabra deriva del término griego *kibernetes* («timonel») y Wiener definió la cibernética como la ciencia del «control y comunicación en el animal y en la máquina».[1]

LA CIBERNÉTICA

La cibernética devino pronto un poderoso movimiento intelectual, que se desarrolló con independencia de la biología organícista y de la teoría general de sistemas. Los cibernéticos no eran ni biólogos ni ecólogos, eran matemáticos, neurocientíficos, científicos sociales e ingenieros. Trataban con un nivel distinto de descripción, que se concentraba en patrones de comunicación, especialmente en redes y bucles cerrados. Sus investigaciones les condujeron a los conceptos de retroalimentación y autorregulación y, más adelante, al de autoorganización.

Esta atención a los patrones de organización, implícita en la biología organicista y en la psicología Gestalt, se convirtió en el motivo central explícito de la cibernética. Wiener, en especial, reconocía que las nuevas nociones de mensaje, control y retroalimentación se referían a pautas de organización -es decir, entidades inmateriales- cruciales para una descripción científica completa de la vida. Más adelante, Wiener amplió el concepto de patrón desde las pautas de comunicación y control comunes a animales y máquinas, hasta la idea general de patrón como característica clave de la vida. «No somos sino remolinos en un río de incesante corriente», escribía en 1950. «No somos materia perdurable, sino pautas que se perpetúan a sí mismas.»[2]

El movimiento cibernético comenzó durante la Segunda Guerra Mundial, cuando un grupo de matemáticos, neurocientíficos e ingenieros -entre ellos Norbert Wiener, John von Neumann, Claude Shannon y Warren McCulloch- formaron una red informal para perseguir intereses científicos comunes.[3] Su trabajo estaba estrechamente ligado a la investigación militar que trataba los problemas de detección y derribo de aparatos de aviación y estaba financiada por el ejército, al igual que la mayor parte de las investigaciones posteriores en cibernética.

Los primeros cibernéticos (como se denominarían a sí mismos varios años después) se pusieron como objetivos el descubrimiento de los mecanismos neuronales subyacentes en los fenómenos mentales y su expresión explícita en lenguaje matemático. Así, mientras que los biólogos organicistas trataban el lado material de la división cartesiana, volviéndose en contra del mecanicismo y explorando la naturaleza de la forma biológica, los cibernéticos dirigían su atención al lado mental. Su intención desde el principio fue crear una ciencia exacta de la mente.[4] Si bien su enfoque era más bien mecanicista, concentrándose en pautas comunes a animales y máquinas, involucraba no obstante muchas ideas novedosas destinadas a ejercer una tremenda influencia en los subsiguientes conceptos sistémicos sobre los fenómenos mentales. En efecto, la ciencia contemporánea de la cognición, que ofrece una concepción científica unificada de cerebro y mente, se remonta directamente a los años pioneros de la cibernética.

El marco conceptual de la cibernética se desarrolló en una serie de encuentros legendarios en la ciudad de Nueva York, conocidos como las Conferencias de Macy.[s] Estos encuentros -especialmente el primero, en 1946- fueron extremadamente estimulantes, y reunieron un extraordinario grupo de personajes altamente creativos que se enzarzaban en intensos diálogos interdisciplinarios para explorar nuevas ideas y modos de pensar. Los participantes se dividieron en dos grupos principales. El primero se formó alrededor de los cibernéticos originales y estaba consti-

tuido por matemáticos, ingenieros y neurocientíficos. El segundo grupo lo constituían científicos de las humanidades que se agruparon alrededor de Gregory Bateson y Margaret Mead. Desde su primer encuentro, los cibernéticos hicieron grandes esfuerzos por salvar el abismo académico que les separaba del área de las humanidades.

Norbert Wiener fue la figura dominante a lo largo de la serie de conferencias, impregnándolas de su entusiasmo por la ciencia y deslumhrando a los demás participantes con el brillo de sus ideas y de sus a menudo irreverentes planteamientos. Según varios testigos presenciales, Wiener tenía la desconcertante costumbre de quedarse dormido durante las discusiones, llegando incluso a roncar, aparentemente sin perder el hilo de lo que se decía. Al despertar, podía hacer de inmediato penetrantes comentarios o señalar inconsistencias lógicas. Disfrutaba plenamente de las discusiones y de su papel central en las mismas.

Wiener no sólo era un brillante matemático, era también un filósofo elocuente (en realidad, su licenciatura por Harvard era en Filosofía). Estaba profundamente interesado por la biología v apreciaba la riqueza de los sistemas vivos y naturales. Miraba más allá de los mecanismos de comunicación y control hacia mayores pautas de organización y trataba de relacionar sus ideas con un amplio espectro de aspectos sociales y culturales.

John von Neumann era el segundo centro de atención de las Conferencias de Macy. Genio de las matemáticas, autor de un tratado de teoría cuántica, fue el iniciador de la teoría del juego y obtuvo fama mundial como inventor del ordenador digital. Poseedor de una poderosa memoria, su mente funcionaba a vertiginosa velocidad. Se decía de él que podía comprender la esencia de un problema matemático casi instantáneamente y que podía analizar cualquier problema -matemático o práctico- con tal claridad, que toda posterior discusión resultaba innecesaria.

En los encuentros de Macy, Von Neumann estaba fascinado por los procesos del cerebro humano y veía la descripción del funcionamiento cerebral en términos de lógica formal como el reto definitivo para la ciencia. Mantenía una confianza tremenda en el poder de la lógica y una gran fe en la tecnología, buscando en su trabajo las estructuras lógicas universales del conocimiento científico.

Von Neumann y Wiener tenían mucho en común.[6] Ambos eran admirados como genios de las matemáticas y su influencia en la sociedad era mucho mayor que la de otros matemáticos de

su generación. Ambos confiaban en sus mentes subconscientes. Como muchos poetas y artistas, tenían la costumbre de dormir con lápiz y papel cerca de sus camas y usar las metáforas de sus sueños en sus trabajos. No obstante, estos dos pioneros de la cibernética diferían substancialmente en su enfoque de la ciencia. Mientras que Von Neumann buscaba control y programa, Wiener apreciaba la riqueza de los patrones naturales y buscaba una sínstesis conceptual de conjunto.

De acuerdo con estas características personales, Wiener se mantenía alejado del poder político, mientras que Von Neumann se sentía muy a gusto cerca de él. En las Conferencias de Macy, sus distintas actitudes frente al poder, especialmente el poder militar, fueron el origen de crecientes fricciones que llegaron a cuajar en ruptura total. Mientras que Von Neumann permaneció como asesor militar durante toda su can-era, especializándose en la aplicación de ordenadores a sistemas de armas, Wiener acabó su trabajo militar poco después de la primera conferencia de Macy. «No pienso publicar ningún otro trabajo», escribía a finales de 1946, «que pueda causar daño en manos de militaristas irresponsables.»[7]

Norbert Wiener tenía una notable influencia sobre Gregory Bateson, con quien mantuvo una excelente relación durante las Conferencias de Macy. La mente de Bateson, al igual que la de Wiener, circulaba libremente entre las disciplinas, desafiando las presunciones básicas y los métodos de varias ciencias mediante la búsqueda de patrones generales y poderosas abstracciones universales. Bateson se veía a sí mismo básicamente como biólogo y consideraba los múltiples campos en que se involucraba -antropología, epistemología y psiquiatría entre otros- como ramas de la biología. La enorme pasión que aportaba a la ciencia abarcaba toda la diversidad de fenómenos relacionados con la vida, siendo su principal objetivo el descubrimiento de principios de organización comunes a esta diversidad: «el patrón que conecta», como diría muchos años después.[8] En las conferencias cibernéticas, ambos, Bateson y Wiener, buscaban descripciones extensivas y holísticas, sin perder la precaución de mantenerse dentro de los límites de la ciencia. De este modo, establecieron un enfoque sistémico para un amplio espectro de fenómenos.

Las conversaciones con Wiener y el resto de cibernéticos tuvieron un impacto permanente en el subsiguiente trabajo de Bateson. Fue el pionero de la aplicación del pensamiento sistémico a la terapia de familia, desarrolló un modelo cibernético del alco-

holismo y fue el autor de la teoría del «callejón sin salida»* para la esquizofrenia, que tuvo a su vez un impacto fundamental en el trabajo de R. D. Laing y muchos otros psiquiatras. No obstante, la mayor contribución de Bateson a la ciencia y a la filosofía quizás haya sido su concepto de mente, basado en principios cibernéticos, que desarrolló durante los años sesenta. Este trabajo revolucionario abrió la puerta a la comprensión de la naturaleza de la mente como fenómeno sistémico y constituyó el primer intento exitoso de la ciencia en la superación de la división cartesiana entre cuerpo y mente.[9]

La serie de diez Conferencias de Macy fue presidida por Warren McCulloch, profesor de psiquiatría y fisiología en la Universidad de Illinois, quien poseía una sólida reputación en investigación sobre el cerebro asegurando que el desafío de alcanzar una nueva comprensión de mente y cerebro se mantuviese en el centro de las conversaciones.

Estos primeros años de la cibernética cuajaron en una serie impresionante de logros, además del perdurable impacto del pensamiento sistémico como un todo, y resulta curioso que la mayoría de las nuevas ideas y teorías se discutieran, al menos a grandes rasgos, en la primera conferencia.[10] Ésta empezó con una extensa presentación de los ordenadores digitales (que aún no habían sido construidos) a cargo de John von Neumann, seguida de su persuasiva descripción de las analogías entre ordenador y cerebro. La base para dichas analogías, que iban a dominar la visión de la cibernética sobre la cognición durante las siguientes tres décadas, era la utilización de la lógica matemática para la comprensión del funcionamiento del cerebro, uno de los mayores logros de la cibernética.

A las presentaciones de Von Neumann, siguió una detallada exposición a cargo de Norbert Wiener de la idea central de su trabajo: el concepto de retroalimentación. Wiener introdujo después una serie de nuevas ideas que se convertirían con el paso del tiempo en las teorías de la información y de la comunicación. Gregory Bateson y Margaret Mead cerraron las presentaciones con un repaso al marco conceptual de las ciencias sociales, al que consideraban inadecuado y necesitado de un trabajo teórico básico inspirado en los nuevos conceptos cibernéticos.

* En el original, *doubk-bind. (N. del T.)*

RETROALIMENTACIÓN

Los mayores logros de la cibernética se alcanzaron en la comparación entre organismos y máquinas -en otras palabras, en los modelos mecanicistas de sistemas vivos-. No obstante, las máquinas cibernéticas son muy distintas de los mecanismos cartesianos de relojería. La diferencia crucial estriba en el concepto de retroalimentación de Wiener y es expresado por el propio significado de «cibernética». Un bucle de retroalimentación* es una disposición circular de elementos conectados causalmente, en la que una causa inicial se propaga alrededor de los eslabones sucesivos del bucle, de tal modo que cada elemento tiene un efecto sobre el siguiente, hasta que el último «retroalimenta» el efecto sobre el primer eslabón en que se inició el proceso (ver figura 4-1). La consecuencia de esta disposición es que el primer eslabón

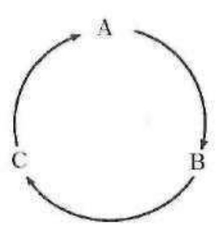


Figura 4-1
Causalidad circular en un bucle de retroalimentación.

(«input») se ve afectado por el último («output»), lo que se traduce en la autorregulación de todo el sistema, al verse modificado el estímulo inicial a lo largo de cada recorrido por el circuito. Retroalimentación, en palabras de Wiener, es el «control de una máquina en base a su comportamiento *real,* y no al *esperado».*[u] En un sentido más amplio, retroalimentación ha venido a significar el retorno de la información a su punto de origen, a través del desarrollo de un proceso o actividad.

El ejemplo original de Wiener sobre el timonel es uno de los más simples de un bucle de retroalimentación (ver figura 4-2). Cuando el barco se desvía de su rumbo -por ejemplo a la derecha-, el timonel evalúa la desviación y la compensa moviendo la rueda a la izquierda. Esto disminuye la desviación de la embarcación, quizás hasta el punto de sobrepasar la posición correcta y desviarse a

*En el original, *feedback loop. (N. del T.)*



Figura 4-2
Bucle de retroalimentación en el pilotaje de una embarcación.

la izquierda. En algún momento del proceso, el timonel evalúa la nueva desviación, corrige en consecuencia, evalúa una nueva desviación y así sucesivamente. El arte de pilotar un navio consiste en mantener estas oscilaciones tan leves como sea posible.

Un mecanismo similar de retroalimentación actúa cuando vamos en bicicleta. Al principio, cuando aprendemos, nos resulta difícil dominar la retroalimentación de los cambios continuos de equilibrio y maniobrar en consecuencia. Así, la rueda delantera de la bicicleta de un principiante oscila fuertemente, pero a medida que nuestra pericia aumenta, nuestro cerebro dirige, evalúa y responde a la retroalimentación automáticamente, hasta que las oscilaciones de la rueda delantera se convierten en una línea recta.

Las máquinas autorreguladoras con bucles de retroalimentación existían mucho antes que la cibernética. El regulador centrífugo del motor a vapor inventado por James Watt a finales del siglo XVIII es un clásico ejemplo y los primeros termostatos fueron inventados todavía antes.[12] Los ingenieros que diseñaron estos primeros sistemas de retroalimentación describían sus componentes mecánicos en croquis y planos, pero nunca llegaron a percibir la pauta de causalidad circular que comportaban. En el siglo xix, el famoso físico James Clerk Maxwell escribió un análisis matemático formal del regulador de vapor sin ni siquiera mencionar el subyacente concepto de bucle. Habría de transcurrir un siglo para que se estableciese el vínculo entre retroalimentación y

causalidad circular. Por entonces, durante la fase pionera de la Cibernética, las máquinas dotadas de bucles de retroalimentación se convirtieron en el centro de atención para la ingeniería, siendo conocidas a partir de aquel momento como «máquinas cibernéticas».

La primera discusión detallada sobre bucles de retroalimentación apareció en un artículo suscrito por Norbert Wiener, Julian Bigelow y Arturo Rosenblueth, publicado en 1943 bajo el título de «Comportamiento, propósito y teleología».[13] En él, los autores no sólo introducían la idea de la causalidad circular como patrón lógico subyacente en el concepto de ingeniería de retroalimentación, sino que aplicaban por primera vez para ilustrar el comportamiento dé los organismos vivos. Desde una postura estrictamente conductista, argumentaban que el comportamiento de toda máquina u organismo comprendiendo la autorregulación desde la retroalimentación podía denominarse «intencionado», al tratarse de comportamiento dirigido a un objetivo. Ilustraban su modelo de semejante comportamiento dirigido a un objetivo con numerosos ejemplos -un gato persiguiendo a un ratón, un perro siguiendo un rastro, una persona levantando un vaso de la mesa, etc.-, analizándolos en términos de sus patrones circulares de retroalimentación subyacentes.

Wiener y sus colegas reconocían además a la retroalimentación como el mecanismo esencial de la homeostasis, la autorregulación que permite a los organismos vivos mantenerse en un estado de equilibrio dinámico. Cuando Walter Cannon introdujo el concepto de homeostasis diez años antes en su influyente libro *The Wisdom of the Body* (La sabiduría del cuerpo),[14] dio descripciones detalladas sobre muchos procesos metabólicos autorreguladores, pero sin llegar a identificar explícitamente los bucles cerrados causales implícitos en ellos. Así pues, el concepto de bucle de retroalimentación introducido por los cibernéticos condujo a nuevas percepciones sobre los múltiples procesos autorreguladores característicos de la vida, gracias a las que hoy entendemos que los bucles de retroalimentación están omnipresentes en el mundo vivo, constituyendo una característica especial de los patrones de red no-lineal propios de los sistemas vivos.

Los cibernéticos distinguían dos clases de retroalimentación: la autoequilibrante (o «negativa») y la autorreforzadora (o «positiva»). Como ejemplos de esta última podemos citar los círculos viciosos, en los que el efecto inicial va ampliándose a medida que circula repetidamente por el bucle.



Figura 4-3
Eslabones causales positivos y negativos.

Puesto que los significados técnicos de «negativo» y «positivo» en este contexto pueden inducir fácilmente a coníusión, sería conveniente explicarlos con mayor detenimiento.[15] Una influencia causal de A a B es positiva si un cambio en A produce un cambio en B en la misma dirección; por ejemplo, un incremento de B si A aumenta o una merma de B si A decrece. El vínculo causal se define como negativo cuando B cambia en la dirección opuesta, disminuyendo si A aumenta y aumentando si A decrece.

Por ejemplo, en el bucle de retroalimentación representativo del pilotaje de un navio, retomado en la figura 4-3, la unión entre «Evaluación de la desviación del rumbo» y «Corrección» es positiva: a mayor desviación, mayor corrección. El próximo vínculo, en cambio, es negativo: a mayor corrección, más disminuye la desviación. Finalmente, el último vínculo es de nuevo positivo: a menor desviación, corresponderá un menor valor de la desviación. La cuestión está en recordar que las etiquetas «+» y «-» no se refieren a un aumento o disminución de valor, sino más bien a la *dirección relativa de cambio* de los elementos vinculados: misma dirección para «+» y dirección opuesta para «-».

La razón por la que estas etiquetas resultan muy convenientes, es que conducen a una regla extremadamente sencilla para determinar el carácter general de todo el bucle de retroalimentación. Éste será autoequilibrante («negativo») si contiene un número impar de vínculos negativos, mientras que será autorreforzador («positivo») si contiene un número par de tales vínculos.[16] En nuestro ejemplo sólo hay una unión negativa, luego el bucle entero es negativo o autoequilibrante. Los bucles de retroalimentación están a menudo compuestos por uniones negativas y positivas simultáneamente y resulta muy sencillo poder determinar su carácter general, simplemente contando los vínculos negativos de todo el bucle.

Los ejemplos del pilotaje de una embarcación o la conducción de una bicicleta resultan ideales para ilustrar el concepto de retroalimentación, ya que se refieren a experiencias humanas bien conocidas y, por tanto, se comprenden inmediatamente. Para ilustrar los mismos principios con un ingenio mecánico, Wiener y sus colegas usaban a menudo uno de los primeros y más simples ejemplos de ingeniería de retroalimentación: el regulador centrífugo de un motor de vapor (ver figura 4-4). Consiste en un huso giratorio con dos pesos esféricos móviles que tienden a separarse, debido a la fuerza centrífuga, a medida que la velocidad de giro aumenta. El regulador se encuentra sobre el cilindro del motor a vapor y los pesos están conectados a un pistón que corta el paso del vapor cuando éstos se separan. La presión del vapor mueve el motor y éste a una rueda que, a su vez, mueve al regulador, quedando así cerrado el bucle de causa-efecto.

La secuencia de retroalimentación queda claramente ilustrada en el diagrama de bucle de la figura 4-5. Un aumento de la ve-

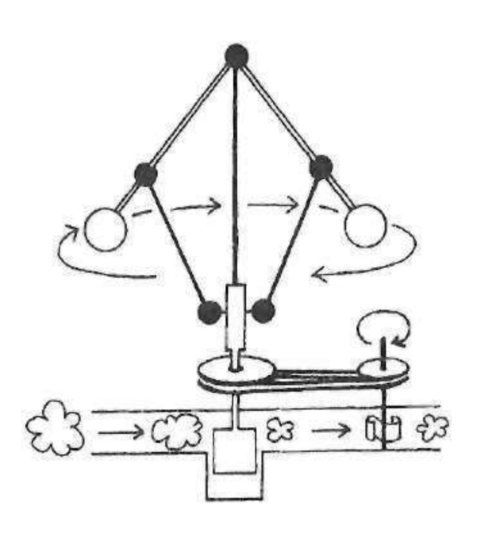


Figura 4-4
Regulador centrífugo.

locidad de la máquina incrementa la rotación del regulador. Ello incrementa la distancia entre los pesos móviles, lo que comporta el ascenso del pistón y el correspondiente corte del flujo de vapor. Al decrecer éste, la velocidad de la máquina disminuye, mengua la rotación del regulador, los pesos recuperan su posición inicial, baja el pistón, aumenta el flujo de vapor, la máquina se acelera y así sucesivamente. El único vínculo negativo en el bucle es el existente entre «distancia entre pesos» y «flujo de vapor», y por tanto, todo el bucle es negativo o autoequilibrador.

Desde el principio de la cibernética, Norbert Wiener se dio cuenta de la importancia del principio de retroalimentación como modelo no sólo de organismos vivos, sino también de sistemas sociales. Así, escribió en *Cibernética:*.

> Es sin duda cierto que el sistema social es una organización como el individual, unida por un sistema de comunicación e imbuida de una dinámica en la que los procesos circulares de naturaleza retroalimentadora tienen un papel principal.[17]

Fue este descubrimiento de la retroalimentación como patrón general de vida, aplicable a organismos y a sistemas sociales, lo que provocó el interés por la cibernética de Gregory Bateson y Margaret Mead. Como científicos sociales, habían observado múltiples ejemplos de causalidad circular implícita en fenómenos sociales, y durante los encuentros de Macy pudieron ver la dinámica de dichos fenómenos explicitada dentro de un patrón unificador coherente.

A través de la historia de las ciencias sociales se han usado numerosas metáforas para describir procesos autorreguladores en la vida social. Los más conocidos son quizás la «mano invisible» reguladora del mercado de la teoría económica de Adam Smith, los «frenos y equilibrios» de la Constitución de los Estados Unidos de América y la interacción entre tesis y antítesis de la dialéctica de Hegel y Marx. Todos los fenómenos descritos por estos modelos y metáforas implican pautas circulares de causalidad que se pueden expresar mediante bucles de retroalimentación, si bien ninguno de sus autores lo hizo explícitamente.[18]

Si el patrón circular lógico de retroalimentación autoequilibradora no había sido percibido con anterioridad a la cibernética, el de retroalimentación autorreforzadora, en cambio, se conocía desde hacía siglos en el lenguaje común como «círculo vicioso».



Figura 4-5
Bucle de relroalimentación del regulador centrífugo.

La expresiva metáfora describe una mala situación que tiende a empeorar a través de una secuencia circular de acontecimientos. Quizás la naturaleza circular de tales bucles de retroalimentación autorreforzadores haya sido percibida antes por la humanidad, debido a sus efectos mucho más dramáticos que los autoequilibradores de los bucles de retroalimentación negativos, tan comunes por otra parte en el mundo viviente.

Existen otras metáforas corrientes para describir fenómenos de retroalimentación autorreforzadora.'" La «profecía inevitable», en la que un temor inicialmente infundado mueve a acciones que provocarán el hecho temido, y la del efecto «vagón de la banda», en la que una causa gana apoyo simplemente por el incremento del número de adeptos, son dos ejemplos bien conocidos.

A pesar del conocimiento extensivo de la sabiduría popular sobre la retroalimentación autorreforzadora, ésta tuvo muy escaso protagonismo en la primera etapa de la cibernética. Los cibernéticos del entorno de Norbert Wiener aceptaban la existencia de fenómenos de retroalimentación positiva pero no los estudiaron en profundidad. En su lugar, se concentraron en los procesos homeostáticos autorreguladores de los organismos vivos. En realidad, en la naturaleza son muy raros los fenómenos puros de retroalimentación autorreforzadora, ya que suelen estar compensados por bucles de retroalimentación negativa que moderan sus tendencias expansivas.

En un ecosistema, por ejemplo, cada especie tiene el potencial de seguir un crecimiento demográfico exponencial, pero esta tendencia queda refrenada por varias interacciones niveladoras

en el seno del sistema. Las tendencias expansivas aparecerán sólo si el sistema se ve seriamente perturbado. Entonces, algunas plantas se convertirán en «maleza», algunos animales en «plaga» y otras especies serán eliminadas, quedando el equilibrio de todo el sistema seriamente comprometido.

Durante los años sesenta, el antropólogo y cibernético Magoroh Maruyama acometió el estudio de los procesos de retroalimentación autorreforzadora o «amplificadora de la desviación» en un artículo ampliamente leído titulado «La segunda cibernética».[20] Introducía en él los diagramas de retroalimentación con etiquetas de «+» y «-» en sus vínculos causales, utilizando esta conveniente anotación para un detallado análisis de la interacción entre procesos de retroalimentación positiva y negativa en fenómenos biológicos y sociales. De este modo, vinculaba el concepto cibernético de retroalimentación a la noción de «causalidad mutua», que había ido siendo desarrollada por científicos sociales, contribuyendo así notablemente a la influencia de la cibernética sobre el pensamiento social.[21]

Desde el punto de vista de la historia del pensamiento sistémico, uno de los aspectos más importantes del estudio exhaustivo de los bucles de retroalimentación realizado por los cibernéticos, fue el reconocimiento de que describen patrones de organización. La causalidad circular de un bucle de retroalimentación no implica que los elementos del correspondiente sistema físico se encuentren dispuestos en círculo. Los bucles de retroalimentación son patrones abstractos de relaciones inmanentes en estructuras físicas o en actividades de organismos vivos. Por primera vez en la historia del pensamiento sistémico, los cibernéticos distinguieron claramente el patrón de organización de un sistema de su estructura física, distinción crucial para la teoría contemporánea de los sistemas vivos.[22]

TEORÍA DE LA INFORMACIÓN

Una parte importante de la cibernética era la teoría de la información desarrollada por Norbert Wiener y Claude Shannon a finales de los años cuarenta. Tuvo su origen en los intentos que realizó Shannon en los laboratorios de la Bell Telephone para definir y medir la cantidad de información transmitida a través de las líneas telegráficas y telefónicas, en orden a determinar su nivel de eficiencia y establecer las bases de tarifación.

El término «información» se usa en teoría de la información en un sentido altamente técnico, muy distinto de nuestro uso coloquial de la palabra y sin ninguna relación con el concepto de «significado». De este hecho se han derivado confusiones sin fin. Según Heinz von Foerster, asiduo participante en las Conferencias de Macy, ello se debe a un desafortunado error lingüístico -la confusión entre «información» y «señal»- que llevó a los cibernéticos a denominar su teoría como de la información en lugar de llamarla teoría de las señales.[23]

Así pues, la teoría de la información trata básicamente de cómo recibir un mensaje, codificado como señal, a través de un canal ruidoso.

No obstante, Norbert Wiener enfatizó también el hecho de que el mensaje codificado es esencialmente un patrón de organización, y esbozando la analogía entre tales patrones de comunicación y las pautas de organización en los organismos, sentó todavía más las bases de la visión de los organismos vivos en términos de patrones.

CIBERNÉTICA DEL CEREBRO

Durante los años cincuenta y sesenta, Ross Ashby fue el teórico que se hallaba al frente del movimiento cibernético. Como McCulloch, Ashby era neurólogo de formación, pero fue mucho más lejos que aquél en la exploración del sistema nervioso y en la construcción de modelos cibernéticos de los procesos neuronales. En su libro *Design foraBrain* (Diseño para un cerebro), Ashby intentaba explicar en términos puramente mecanicistas y deterministas el comportamiento adaptativo, la capacidad de memoria y otras pautas del funcionamiento del cerebro. «Supondremos», escribía, «que un animal o máquina actuarán de un determinado modo en un determinado momento porque su naturaleza física y química en aquel momento no permiten otra acción.»[24]

Es evidente que Ashby era mucho más cartesiano en su acercamiento a la cibernética que Norbert Wiener, quien establecía una clara distinción entre un modelo mecanicista y el sistema vivo no mecanicista que el primero representa. «Cuando comparo el organismo vivo con... una máquina», escribía Wiener, «de ningún modo quiero decir que los procesos físicos, químicos y espirituales específicos de la vida tal y como la conocemos comúnmente sean los mismos que los de las máquinas imitadoras de vida.»[25]

A pesar de su imagen estrictamente mecanicista, Ross Ashby adelantaba la incipiente disciplina de la ciencia cognitiva con su detallado análisis de sofisticados modelos cibernéticos de procesos neuronales. En particular, admitía claramente que los sistemas vivos son energéticamente abiertos y al mismo tiempo, en terminología actual, organizativamente cerrados: «La cibernética podría... definirse», escribía Ashby, «como el estudio de sistemas que están abiertos a la energía pero cerrados a la información y al control, sistemas que son "estancos a la información".»[26]

MODELOS INFORMÁTICOS DE COGNICIÓN

Cuando los cibernéticos exploraban patrones de comunicación y control, la dificultad en comprender «la lógica de la mente» y expresarla en lenguaje matemático era constantemente tema central en sus discusiones. De este modo, y a lo largo de una década, las ideas clave de la cibernética se desarrollaron a través de un fascinante intercambio entre biología, matemáticas e ingeniería. Estudios detallados del sistema nervioso humano condujeron a representar el cerebro como un circuito lógico, con las neuronas como sus elementos básicos. Esta visión resultó crucial para la invención de las computadoras digitales, cuyo avance tecnológico proporcionó a su vez, la base conceptual para un nuevo enfoque del estudio científico de la mente. La invención del ordenador por John von Neumann y su analogía entre computación y funcionamiento cerebral están tan íntimamente ligadas que resulta difícil decir cuál fue la primera.

El modelo informático de actividad mental se convirtió en la visión predominante de la ciencia cognitiva y dominó toda la investigación cerebral durante los siguientes treinta años. La idea básica era que la inteligencia humana se asemeja a la de un ordenador hasta tal punto que la cognición -el proceso del conocimiento- puede definirse como procesamiento de datos; en otras palabras, como manipulación de símbolos basados en un conjunto de reglas.[27]

El campo de la inteligencia artificial se desarrolló como consecuencia directa de esta visión y pronto abundaron en la literatura monstruosas proclamas sobre la «inteligencia» informática. Así, Herbert Simon y Alien Newell escribían, ya en 1958:

> Existen en el mundo actual máquinas que piensan, que aprenden y que crean. Además, su habilidad para hacerlo va a aumentar rápidamente hasta que, en un futuro próximo, el ámbito de problemas que podrán manipular será del mismo calibre que el que la mente humana ha venido manejando.[28]

Esta predicción era tan absurda hace treinta y ocho años como hoy en día, pero, no obstante, sigue siendo ampliamente aceptada. El entusiasmo entre los científicos y el público en general por la computadora como metáfora para el cerebro humano tiene un interesante paralelismo con el de Descartes y sus contemporáneos por el reloj como metáfora para el cuerpo.[29] Para Descartes, el reloj era una máquina excepcional. Era la única máquina que funcionaba autónomamente, haciéndolo por sí misma una vez se le había dado cuerda. Era la época del Barroco francés, en la que se usaban con frecuencia mecanismos de relojería para animar artísticas «máquinas vivas», que provocaban el deleite del público con la magia de sus aparentemente espontáneos movimientos. Como la mayoría de sus contemporáneos, Descartes estaba fascinado por estos autómatas, encontrando natural comparar su funcionamiento con el de los organismos vivos:

> Vemos relojes, fuentes artificiales, molinos y otras máquinas similares que, aunque están hechas por el hombre, tienen no obstante el poder de moverse de diversos modos (...). No reconozco diferencia alguna entre las máquinas hechas por los artistas y los diversos cuerpos que la naturaleza sola compone.[30]

Los mecanismos de relojería del siglo XVII, fueron las primeras máquinas autónomas y, a lo largo de trescientos años, fueron únicas en su especie hasta la invención del ordenador. Éste es de nuevo una novedosa y excepcional máquina. No sólo se mueve autónomamente una vez programado y conectado, sino que además hace algo completamente nuevo: procesa información. Puesto que Von Neumann y los primeros cibernéticos creían que el cerebro humano procesaba asimismo información, era natural para ellos usar la computadora como metáfora del cerebro e incluso de la mente, del mismo modo que lo había sido para Descartes el uso del reloj como metáfora del cuerpo.

Al igual que el modelo cartesiano del cuerpo como una máquina, el del cerebro como un ordenador resultó muy útil al principio, proveyendo de un marco estimulante para una nueva com-

prensión científica de la cognición y conduciendo a nuevas vías de investigación. A mitad de los años sesenta, no obstante, el modelo original que animó a la exploración de sus propias limitaciones y a la discusión de alternativas se había petrificado como dogma, como tan a menudo sucede en la ciencia. Durante la década siguiente, casi toda la neurobiología se vio dominada por la perspectiva del proceso de información, cuyos orígenes y presunciones subyacentes ni siquiera se cuestionaban ya.

Los científicos informáticos contribuyeron significativamente al firme establecimiento del dogma del proceso de información al utilizar palabras tales como «inteligencia», «memoria» y «lenguaje» para describir a las computadoras, lo que ha inducido a la mayoría de personas -incluyendo a los mismos científicos- a pensar que dichos términos se refieren a los equivalentes y bien conocidos fenómenos humanos. Esto, no obstante, es un grave malentendido que ha ayudado a perpetuar y aun reforzar la imagen cartesiana de los seres humanos como máquinas.

Recientes progresos de la ciencia cognitiva han dejado claro que la inteligencia humana es radicalmente distinta a la inteligencia de las máquinas o inteligencia «artificial». El sistema nervioso humano no procesa información alguna -en el sentido de discretos elementos prefabricados existentes en el mundo exterior, listos para ser atrapados por el sistema cognitivo- sino que interactúa con el entorno por medio de una constante modulación de su estructura.[31] Es más, los neurocientíficos han encontrado seria evidencia de que la inteligencia, la memoria y las decisiones humanas no son nunca enteramente racionales, sino que siempre están influenciadas por emociones, como sabemos por propia experiencia.[32] Nuestro pensamiento está siempre acompañado por sensaciones y procesos corporales, y aunque a menudo tendamos a intentar suprimirlos, pensamos *también* con nuestro cuerpo. Puesto que los ordenadores carecen de tal cuerpo, los verdaderos problemas humanos siempre permanecerán extraños a su inteligencia.

Estas consideraciones implican que ciertas tareas no deberían confiarse jamás a los ordenadores, como Joseph Weizenbaum afirmaba enfáticamente en su libro *Computer Power and Human Reason* (Poder informático y razón humana). Estas tareas incluyen aquellas que requieren cualidades genuinamente humanas tales como sabiduría, compasión, respeto, comprensión o amor. Si se confían a los ordenadores las decisiones y comunicaciones que requieren estas cualidades, nuestras vidas se deshumanizarán. Citando a Weizenbaum:

> Hay que trazar una línea divisoria entre la inteligencia humana y la de la máquina. Si tal línea no existe, los que abogan por la psicoterapia computerizada podrían ser meramente los heraldos de una era en la que el hombre sería finalmente reconocido como nada más que un mecanismo de relojería... El mismo hecho de preguntar «¿Qué sabe un juez (o un psiquiatra) que no le podamos decir a una computadora?» es una monstruosa obscenidad.[33]

EL IMPACTO EN LA SOCIEDAD

Debido a su vínculo con la ciencia mecanicista y a sus fuertes conexiones con lo militar, la cibernética disfrutó de enorme prestigio entre el mundo científico desde sus inicios. A lo largo de los años, este prestigio se incrementó todavía más a medida que los ordenadores proliferaban por todos los estratos de la comunidad industrial, llevando profundos cambios a cada área de nuestras vidas. Norbert Wiener predijo estos cambios -que han sido a menudo equiparados a una segunda revolución industrial- durante los primeros años de la cibernética. Más aún, percibió claramente el lado oscuro de la nueva tecnología que había ayudado a crear:

> Aquellos de entre nosotros que hemos contribuido a la nueva ciencia de la cibernética (...) nos hallamos en una situación moral que no es, por decirlo suavemente, muy confortable. Hemos contribuido al inicio de una nueva ciencia que... combina desarrollos técnicos con grandes posibilidades para el bien y para el mal.[34]
>
> No debemos olvidar que la máquina automática (...) es el equivalente exacto del trabajo de esclavos. Toda mano de obra que deba competir con el trabajo de esclavos, deberá aceptar las condiciones económicas de éste. Está perfectamente claro que esto producirá una situación de desempleo, en comparación con la cual la recesión actual e incluso la depresión de los años treinta parecerán bromas graciosas.[35]

Resulta evidente en éste y en otros pasajes similares de los escritos de Wiener, que éste mostraba mucha mayor sabiduría y visión en su valoración del impacto social de los ordenadores que sus sucesores. Hoy, cuarenta años después, los ordenadores y

muchas otras «tecnologías de la información» desarrolladas en este lapso se convierten rápidamente en autónomas y totalitarias, redefiniendo nuestros conceptos básicos y eliminando puntos de vista alternativos. Como Neil Postman, Jerry Mander y otros críticos de la tecnología han puesto de manifiesto, ello es típico de las «megatecnologías» que han llegado a dominarlas sociedades industriales alrededor del mundo.[36] Cada vez más, toda forma de cultura queda subordinada a la tecnología, y la innovación tecnológica, más que el aumento del bienestar humano, se ha convertido en sinónimo de progreso.

El empobrecimiento espiritual y la pérdida de diversidad cultural derivados del uso excesivo de ordenadores, es especialmente grave en el campo de la educación. Como Neil Postman señala certeramente: «Cuando se usa un ordenador para aprender, el propio sentido de "aprender" queda alterado.»[37] La utilización de ordenadores en la enseñanza se ensalza a menudo como una revolución que transformará virtualmente cada faceta del proceso educativo. Esta visión está fuertemente promocionada por la industria de la informática, que anima a los maestros a utilizar ordenadores como herramientas educativas a todos los niveles -¡incluso en el jardín de infancia y en preescolar!-, sin ni siquiera mencionar los muchos electos perniciosos que semejantes prácticas irresponsables pueden causar.[38]

El uso de ordenadores en la escuela está basado en la ya desfasada visión de los seres humanos como procesadores de información, que refuerza a su vez constantemente erróneos conceptos mecanicistas sobre pensamiento, conocimiento y comunicación. La información es presentada como la base del pensamiento mientras que, en realidad, la mente humana piensa con ideas, no con información. Como Theodore Roszak demuestra en detalle en *The Culi: of Information* (El culto a la información), ésta no crea ideas; las ideas crean la información. Las ideas son patrones integradores que no derivan de la información, sino de la experiencia.[39]

En el modelo informático de cognición, el conocimiento es visto como un valor libre, basado en datos abstractos. Pero todo conocimiento significativo es conocimiento contextual, siendo una gran parte del mismo tácito y experimental. De forma similar, el lenguaje es visto como un conducto a través del cual se comunica información «objetiva». En realidad, como C. A. Bowers ha discutido elocuentemente, el lenguaje es metafórico y transmite entendimientos tácitos compartidos en el seno de una cultura.[40] Resulta también importante destacar que el lenguaje empleado por los científicos e ingenieros informáticos está lleno de metáforas derivadas de lo militar -«comando», «escape», «blindado», «piloto», «objetivo», etc.-, lo que introduce desviaciones culturales, refuerza estereotipos e inhibe a ciertos grupos, incluyendo las chicas más jóvenes en edad escolar, de una plena participación en la experiencia educativa.[41] Un motivo adicional de preocupación, íntimamente relacionado con lo expuesto, es Ja violencia y la naturaleza militarista de la mayoría de juegos de ordenador.

Tras dominar la investigación cerebral y la ciencia cognitiva durante treinta años y haber creado un paradigma de tecnología ampliamente extendido aún en nuestros días, el dogma del proceso de información se vio por fin seriamente cuestionado.[42] Durante la etapa pionera de la cibernética, se habían planteado ya argumentos críticos como, por ejemplo, que en los cerebros reales no existen reglas, no hay un procesador central lógico y la información no se almacena localmente. Los cerebros parecen operar sobre la base de la conectividad masiva, almacenando la información distributivamente y manifestando una capacidad autoorganizadora imposible de hallar en los ordenadores. No obstante, estas ideas alternativas se vieron eclipsadas por la visión informaticista dominante hasta que resurgieron durante los años setenta, en que los pensadores sistémicos quedaron fascinados por un nuevo fenómeno con un nombre evocador: la autoorganización.

Tercera parte

Las piezas del puzzle

PENSAMIENTO STSTÉMICO APLICADO

Durante los años cincuenta y sesenta, el pensamiento sistémico tuvo una gran influencia en la ingeniería y la gestión de empresas, donde los conceptos sistémicos -incluyendo los cibernéticos- se aplicaron para la resolución de problemas prácticos. Estas aplicaciones dieron lugar a las nuevas disciplinas de la ingeniería sistémica, el análisis sistémico y la administración sistémica de empresas.[1]

A medida que las empresas industriales veían aumentar su complejidad con el desarrollo de nuevas tecnologías en química, electrónica y comunicaciones, sus administradores e ingenieros debían preocuparse no sólo de gran cantidad de componentes individuales, sino también de los efectos provenientes de las mutuas interacciones entre éstos, tanto en los sistemas físicos como en los organizativos. Así, muchos ingenieros y administradores de proyectos de grandes compañías empezaron a formular estrategias y metodologías que utilizaban explícitamente conceptos sistémicos. Pasajes como el siguiente formaban parte de muchos de los textos de ingeniería sistémica publicados en los años sesenta:

> El ingeniero sistémico debe ser capaz también de predecir las propiedades emergentes del sistema, es decir, esas propiedades que posee el sistema pero no sus partes.[2]

El método de pensamiento estratégico conocido como «análisis sistémico» fue utilizado por primera vez por la RAND Corporation, una institución de investigación y desarrollo militar fundada a finales de los cuarenta, que se convirtió en modelo para

numerosos gabinetes de estrategia* especializados en diseño de programas y desarrollo de tecnologías.[3] El análisis sistémico nació de la investigación de operaciones -el análisis y planeamiento de operaciones militares- durante la Segunda Guerra Mundial. Éste incluía la coordinación del uso del radar con operaciones de defensa antiaérea, cuyo problema dio origen también al desarrollo teórico de la cibernética.

Durante los años cincuenta, el análisis sistémico fue más allá de las aplicaciones militares y se convirtió en un amplio planteamiento sistémico para el análisis de costes y beneficios, incluyendo modelos matemáticos para examinar un abanico de programas alternativos diseñados para cumplir un objetivo bien definido. En palabras de un popular texto publicado en 1968:

> Te esfuerzas en contemplar el problema entero, como un todo, en su contexto y en comparar las elecciones alternativas a la luz de sus posibles resultados.[4]

Bien pronto, tras el desarrollo del análisis sistémico como un método para manejar complejos problemas organizativos en el campo militar, los gestores de empresas empezaron a usar este nuevo enfoque para resolver problemas similares en el mundo de la empresa y los negocios. «La gestión sistémicamente orientada» se convirtió en la nueva expresión de moda y durante los años sesenta y setenta, se publicó una pléyade de libros sobre administración de empresas con la palabra «sistémico» en sus títulos.[5] La técnica de modelaje de «dinámica sistémica» desarrollada por Jay Forrester y la «cibernética de la gestión» de Stafford Beer son ejemplos de formulaciones extensivas tempranas del enfoque sistémico de la administración de empresas.[6]

Una década después, un planteamiento similar, aunque mucho más sutil, fue desarrollado por Hans Ulrich en la Escuela de Negocios de St. Gallen en Suiza.[7] El enfoque de Ulrich es ampliamente conocido en el entorno europeo de la empresa como el «modelo de St. Gallen». Éste se basa en la visión de la organización de los negocios como un sistema social vivo con los años, ha incorporado muchas ideas de biología, ciencia cognitiva, ecología y teoría de la evolución. Estos desarrollos más recientes dieron lugar a la nueva disciplina de «gestión sistémica», enseñada

* En el original, *think tanks. (N. del T.)*

en la actualidad en las escuelas europeas de negocios y aconsejada por los consultores de empresa.[8]

LA APARICIÓN DE LA BIOLOGÍA MOLECULAR

Mientras que el enfoque sistémico tenía una considerable influencia en la administración de empresas y en la ingeniería durante los años cincuenta y sesenta, su incidencia en el campo de la biología era paradójicamente casi inexistente. Los cincuenta fueron la década de la elucidación de la estructura física del ADN, un triunfo espectacular de la genética que ha sido ensalzado como el mayor descubrimiento en biología desde la teoría de la evolución de Darwin. Durante varias décadas, este acontecimiento triunfal eclipsó totalmente la visión sistémica de la vida. El péndulo oscilaba de nuevo hacia el mecanicismo.

Los logros de la genética acarrearon un cambio significativo en la investigación biológica, una nueva perspectiva que, aún hoy, domina nuestras instituciones académicas. Mientras que las células se veían como los componentes básicos de los organismos vivos durante el siglo xix, la atención cambió de las células a las moléculas a mediados del siglo xx, cuando los geneticistas empezaron a explorar la estructura molecular del gen.

Avanzando hacia niveles cada vez más pequeños en sus exploraciones del fenómeno de la vida, los biólogos encontraron que las características de todos los organismos vivos -desde las bacterias hasta los seres humanos- se hallaban codificadas en sus cromosomas con la misma substancia química y con el mismo código. Tras dos décadas de intensa investigación, los detalles precisos de este código fueron desvelados. Los biólogos habían descubierto el alfabeto del verdaderamente universal lenguaje de la vida.[9]

Este triunfo de la biología molecular derivó en la creencia generalizada de que todas las funciones biológicas pueden ser explicadas en términos de estructuras moleculares y mecanismos. De este modo, la mayoría de biólogos se han convertido en fervientes reduccionistas, ocupados en detalles moleculares. La biología molecular, originalmente una pequeña rama de las ciencias de la vida, se ha convertido en un omnipresente y excluyente modo de pensar que ha conducido a una grave distorsión en la investigación biológica.

Al mismo tiempo, los problemas que se resistían al enfoque reduccionista de la biología molecular se pusieron más de manifiesto durante la segunda mitad de nuestro siglo. Mientras que

los biólogos pueden conocer la estructura precisa de unos pocos genes, saben muy poco de los modos en que dichos genes se comunican y cooperan en el desarrollo de un organismo. En otras palabras, conocen el alfabeto del código genético, pero no tienen casi idea de su sintaxis. Se sabe ya que la mayor parte del ADN -quizás hasta un 95%- puede ser usado para actividades integrativas de las que los biólogos permanecerán ignorantes mientras mantengan su adhesión a los modelos mecanicistas.

CRÍTICA DEL PENSAMIENTO SISTÉMICO

A mitad de los años setenta, las limitaciones del enfoque molecular a la comprensión de la vida eran ya evidentes. Sin embargo, los biólogos veían poca cosa más en el horizonte. El eclipse del pensamiento sistémico en la ciencia era tan completo que no se le consideraba como alternativa viable. De hecho, la teoría de sistemas empezó a ser vista como un fracaso intelectual en varios ensayos críticos. Robert Lilienfeld, por ejemplo, concluía su excelente informe *The Rise of Systems Theory* (La emergencia de la teoría sistémica), publicado en 1978, con la siguiente crítica devastadora:

> Los pensadores sistémicos muestran fascinación por definiciones, conceplualizaciones y declaraciones programáticas de naturaleza benevolente y vagamente moralizadora... Toman analogías entre los fenómenos de un campo y de otro... cuya descripción parece proporcionarles un deleite estético en el que estriba su propia justificación... No existe evidencia de que la teoría de sistemas haya sido usada con éxito en la solución de ningún problema substantivo en campo alguno.[10]

La última parte de esta crítica resulta definitivamente injustificada en la actualidad, como veremos en los siguientes capítulos, y posiblemente fue demasiado dura, incluso en los años setenta, en que se podría haber argumentado que la comprensión de los organismos vivos como sistemas energéticamente abiertos pero organizativamente cerrados, el reconocimiento de la retroalimentación como el mecanismo esencial de la homeostasis y los modelos cibernéticos de los procesos neuronales -por citar sólo tres ejemplos bien establecidos por aquel entonces- representaron avances mayúsculos en la comprensión científica de la vida.

No obstante, Lilienfeld tenía razón en el sentido de que ninguna teoría formal de sistemas del tipo contemplado por Bogdanov y Bertalanffy había sido aplicada con éxito en ningún campo. Ciertamente, el objetivo de Bertalanffy -desarrollar su teoría general de sistemas en una «disciplina matemática, puramente formal en sí misma, pero aplicable a las diversas ciencias empíricas»- nunca se había logrado.

El principal motivo de este «fracaso» era la ausencia de técnicas matemáticas para tratar con la complejidad de los sistemas vivos. Tanto Bogdanov como Bertalanffy reconocían que en los sistemas abiertos las interacciones simultáneas de diversas variables generaban los patrones de organización característicos de la vida, pero carecían de los medios para describir matemáticamente la emergencia de dichos patrones. Técnicamente hablando, las matemáticas de su tiempo se limitaban a las ecuaciones lineales, totalmente inadecuadas para describir la naturaleza altamente no-lineal de los sistemas vivos."

Los cibernéticos se concentraron en fenómenos no-lineales tales como bucles de retroalimentación y redes neuronales, disponiendo de los principios de unas matemáticas correspondientemente no-lineales, pero el verdadero salto cualitativo llegó varias décadas después, íntimamente ligado al desarrollo de una nueva generación de potentes ordenadores.

Si bien los planteamientos sistémicos desarrollados durante la primera mitad de siglo no cuajaron en una teoría matemática formal, sí crearon un cierto modo de pensar, un nuevo lenguaje, nuevos conceptos y todo un clima intelectual que ha conducido a importantes avances científicos en los años recientes. En lugar de una *teoría de sistemas* formal, la década de los ochenta vio el desarrollo de una serie de *modelos sistémicos* exitosos que describen varios aspectos del fenómeno de la vida. Desde dichos modelos, ha aparecido unida al lenguaje matemático adecuado una teoría coherente de los sistemas vivos.

LA IMPORTANCIA DEL PATRÓN

Los recientes avances en nuestra comprensión de los sistemas vivos se basan en dos novedades surgidas a finales de los años setenta, durante los mismos años en que Lilienfeld y otros escribían sus críticas al pensamiento sistémico. La primera fue el descubrimiento de la nueva matemática de la complejidad, que comentare-

mos en el próximo capítulo. La otra fue la emergencia de un nuevo y poderoso concepto, el de la autoorganización, que había estado implícito en las primeras discusiones de los cibernéticos, pero que no se desarrollaría explícitamente hasta treinta años después.

Para entender el fenómeno de la autoorganización, debemos comprender primero la importancia del patrón. La idea de un patrón de organización-una configuración de relaciones características de un determinado sistema- se convirtió en el centro explícito del pensamiento sistémico en cibernética y desde entonces ha sido un concepto crucial. Desde el punto de vista sistémico, la comprensión de la vida empieza con la comprensión del patrón.

Ya hemos visto que, a través de la historia de la ciencia y de la filosofía occidentales, ha existido una tensión entre el estudio de la substancia y el estudio de la forma.[12] El estudio de la substancia empieza con la pregunta: ¿de qué está hecho?; por el contrario, el estudio de la forma inquiere: ¿Cuál es su patrón? Ambos son acercamientos muy distintos que han venido compitiendo a lo largo de nuestra tradición científica y filosófica.

El estudio de la substancia empezó en el siglo vi a.C. en la Grecia antigua, cuando Tales, Parménides y otros filósofos preguntaron: ¿De qué está hecha la realidad? ¿Cuáles son los constituyentes últimos de la materia? ¿Cuál es su esencia? Las respuestas a estas preguntas definen las diversas escuelas de la era temprana de la filosofía griega. Entre ellas está la idea de cuatro elementos fundamentales: tierra, aire, fuego y agua. En tiempos modernos, éstos fueron refundidos en los elementos químicos, más de cien en la actualidad pero, con todo, un número finito de elementos últimos de los que toda materia se creía formada. Luego Dalton identificó los elementos con los átomos, y al surgir la física atómica y nuclear en el siglo xx, los elementos se vieron reducidos a partículas subatómicas.

De forma similar, los elementos básicos en biología fueron inicialmente organismos o especies y en el siglo xviu los biólogos desarrollaron detallados esquemas de clasificación de animales y plantas. Luego, con el descubrimiento de las células como elementos comunes a todos los organismos, la atención se desplazó de los organismos a las células. Finalmente, la célula fue separada en macromoléculas -enzimas, proteínas, aminoácidos, etc.- y la biología molecular se convirtió en la nueva investigación de írontera. En todos estos empeños, la cuestión seguía siendo la misma que en la Antigüedad griega: ¿De qué está hecha la realidad? ¿Cuáles son sus constituyentes últimos?

Simultáneamente, a lo largo de la misma historia de la filosofía y de la ciencia, el estudio del patrón siempre estuvo presente. Empezó con los pitagóricps en Grecia y continuó con los alquimistas, los poetas románticos y otros movimientos intelectuales. En la mayor parte del tiempo, sin embargo, el estudio del patrón fue eclipsado por el estudio de la substancia hasta resurgir con fuerza en nuestro siglo, en el que fue reconocido por los pensadores sistémicos como esencial para la comprensión de la vida.

Entiendo que la llave de una teoría completa de los sistemas vivos radica en la síntesis de estos planteamientos tan dispares: el estudio de la substancia (o estructura) y el estudio de la forma (o patrón). En el estudio de la estructura medimos y pesamos cosas. Los patrones, en cambio, no pueden ser medidos ni pesados; deben ser cartografiados. Para comprender un patrón debemos cartografiar una configuración de relaciones. En otras palabras: estructura implica cantidades, mientras que patrón implica cualidades.

El estudio del patrón es crucial para la comprensión de los sistemas vivos, puesto que las propiedades sistémicas -como hemos visto- emergen de una configuración de relaciones ordenadas.[13] Las propiedades sistémicas son propiedades de un patrón. Lo que se destruye cuando un sistema vivo es diseccionado, es su patrón. Sus componentes siguen ahí, pero la configuración de las relaciones entre ellos -el patrón- ha sido destruida y en consecuencia el organismo muere.

La mayoría de científicos reduccionistas no pueden comprender las críticas al reduccionismo porque no llegan a entender la importancia del patrón. Afirman que todos los organismos vivos están hechos en última instancia de los mismos átomos y moléculas que componen la materia inorgánica y que, por tanto, las leyes de la biología pueden ser reducidas a las de la física y la química. Si bien es cierto que todos los organismos vivos están hechos en última instancia de átomos y moléculas, son «algo más» que átomos y moléculas. Existe algo más en la vida, algo inmaterial e irreducible: el patrón de organización.

REDES: LOS PATRONES DE LA VIDA

Una vez apreciada la importancia del patrón para la comprensión de la vida, podemos preguntarnos: ¿hay un patrón de organización común que pueda ser identificado en todos los seres vivos? Veremos que, efectivamente, así es. Este patrón de or-

ganización, común a todos los seres vivos, será analizado en detalle más adelante.[14] Su propiedad más importante es que se trata de un patrón en forma de red. Dondequiera que encontremos sistemas vivos -organismos, partes de organismos o comunidades de organismos-, podremos observar que sus componentes están dispuestos en forma de red. Si vemos vida, vemos redes.

Esta constatación llegó a la ciencia en los años veinte, cuando los ecólogos empezaron a estudiar las redes de alimentación. Poco después, reconociendo la red como el patrón general de vida, los pensadores sistémicos generalizaron los modelos en red a todos los niveles de los sistemas. Los cibernéticos en particular, trataron de entender el cerebro como una red neuronal y desarrollaron técnicas matemáticas específicas para analizar sus patrones. La estructura del cerebro humano es extraordinariamente compleja. Contiene alrededor de diez mil millones de células nerviosas (neuronas) interconectadas en una vasta red a través de un billón de conexiones (sinápsis). Puede ser dividido en subsecciones o subredes, que se comunican entre sí en forma de red. Todo ello origina patrones intrincados de tramas interconectadas, redes anidando en el seno de redes mayores.[IS]

La primera y más obvia propiedad de cualquier red es su nolinealidad, va en todas direcciones. Por lo tanto, las relaciones en un patrón en red son relaciones no-lineales. En particular, un estímulo o mensaje puede viajar en un camino cíclico, que puede convertirse en un bucle de retroalimentación. El concepto de retroalimentación está íntimamente ligado al de patrón en red.[16]

Puesto que las redes de comunicación pueden generar bucles de retroalimentación, son capaces también de adquirir la habilidad de regularse a sí mismas. Por ejemplo, una comunidad que mantiene una red de comunicaciones activa aprenderá de sus errores, ya que las consecuencias de un error se extenderán por toda la red, volviendo al origen a lo largo de bucles de retroalimentación. Así la comunidad podrá corregir sus errores, regularse a sí misma y organizarse. En realidad, la autorregulación ha emergido quizás como *el* concepto central de la visión sistémica de la_vida y al igual que los conceptos de retroalimentación y autorregulación, está íntimamente ligado a las redes. El patrón para la vida, podríamos decir, es un patrón capaz de autoorganizarse. Ésta es una sencilla definición, pero se basa en los recientes descubrimientos de la mismísima vanguardia de la ciencia.

El concepto de autoorganización se originó en los primeros años de la cibernética, cuando los científicos comenzaron a construir modelos matemáticos para representar la lógica inherente en las redes neuronales. En 1943, el neurocientífico Warren McCulloch y el matemático Walter Pitts publicaban un trabajo pionero titulado «Un cálculo lógico de las ideas inmanentes en la actividad nerviosa», en el que demostraban que la lógica de todo proceso, de cualquier comportamiento, puede ser transformada en reglas para la construcción de una red.'[7]

En su publicación, los autores introducían neuronas idealizadas representadas por elementos conmutadores binarios -es decir, elementos que pueden ser conectados en «marcha» o «paro»-* y modelaron el sistema nervioso como complejas redes de estos elementos conmutadores binarios. En una red McCulloch-Pitts, los nodos «marcha-paro» están acoplados de tal modo que la actividad de cada nodo está comandada por la actividad previa de otros, según una determinada «regla de conexión». Por ejemplo, un nodo podrá conectarse en «marcha» en un determinado momento, sólo si en aquel momento un cierto número de nodos están en posición de «marcha». McCulloch y Pitts fueron capaces de demostrar que, si bien semejantes redes binarias constituyen modelos simplificados, no obstante son buenas aproximaciones a las redes embebidas en el sistema nervioso.

En los años cincuenta, los científicos empezaron a construir modelos reales de estas redes binarias, incluyendo algunas con pequeñas bombillas que se encendían y apagaban en los nodos. Para su gran asombro, descubrieron que, tras algún tiempo de parpadeos aleatorios, emergían algunos patrones ordenados en la mayoría de redes. Podían observar ondas de parpadeos fluyendo a través de la red, o bien ciclos repetidos. Aun cuando el estado inicial de la red fue escogido al azar, al cabo de un tiempo emergían espontáneamente los patrones ordenados. A esta emergencia espontánea de orden, se la denominó «autoorganización».

Tan pronto como dicho término evocador apareció en la literatura, los pensadores sistémicos empezaron a utilizarlo profusamente en diferentes contextos. Ross Ashby, en sus primeros trabajos, fue probablemente el primero en describir el sistema nervioso como «autoorganizador».[18] El físico y cibernético Heinz von

* En el original *on y off. (N. del T.)*

Foerster se convirtió en el principal catalizador de la idea de la autoorganización a finales de los años cincuenta, dando conferencias sobre el tema, buscando soporte financiero para muchos de los participantes y publicando sus aportaciones.[19]

Durante dos décadas, Foerster mantuvo un grupo de investigación interdisciplinaria dedicado al estudio de sistemas autoorganizadores. Con base en el Laboratorio de Informática Biológica de la Universidad de Illinois, este grupo era un reducido círculo de amigos y colegas que trabajaban alejados de la principal comente reduccionista y cuyas ideas, adelantadas a su tiempo, no tuvieron mucha difusión. No obstante, estas ideas fueron las semillas de muchos de los modelos de sistemas auto-organizadores desarrollados con éxito a finales de los años setenta y en los ochenta.

La propia contribución de Heinz von Foerster a la comprensión teórica de la autoorganización llegó muy pronto y estaba relacionada con el concepto de orden. Se preguntó: ¿Existe una medida de orden que pueda ser utilizada para definir el incremento de orden implicado por la «organización»? Para resolver este problema, Foerster empleó el concepto de «redundancia», definido matemáticamente en la teoría de la información por Claude Shannon y que mide el orden relativo del sistema en relación con el máximo desorden posible en el mismo.[20]

Con el tiempo, este planteamiento se ha visto superado por las nuevas matemáticas de la complejidad, pero a finales de los años cincuenta, permitió a Foerster desarrollar un primer modelo cualitativo de autoorganización en los sistemas vivos. Acuñó la expresión «orden desde el ruido» para indicar que un sistema auto-organizador no «importa» simplemente orden desde su entorno, sino que absorbe materia rica en energía y la integra en su propia estructura, aumentando así su orden interno.

Durante los años setenta y ochenta, las ideas clave de este modelo inicial fueron redefinadas y elaboradas por investigadores en varios países, quienes exploraron los fenómenos de autoorganización en muchos sistemas distintos, desde los muy pequeños hasta los muy grandes: Ilya Prigogine en Bélgica, Hermann Haken y Manfred Eigen en Alemania, James Lovelock en Inglaterra, Lynn Margulis en Estados Unidos, Humberto Maturana y Francisco Varela en Chile.[21] Los modelos resultantes de los sistemas autoorganizadores comparten ciertas características clave, que son los ingredientes básicos de la emergente teoría de sistemas vivos, cuya discusión es el objetivo de este libro.

La primera diferencia importante entre primer concepto de autoorganización en cibernética y los modelos posteriores más elaborados, estriba en que éstos incluyen la creación de nuevas estructuras y nuevos modelos de comportamiento en el proceso de autoorganización. Para Ashby, los posibles cambios estructurales tienen lugar dentro de un determinado «fondo de variedad» de estructuras y las probabilidades de supervivencia del sistema dependen de la riqueza o «variedad de requisitos» de dicho fondo. No hay creatividad, desarrollo o evolución. Los últimos modelos, en cambio, incluyen la creación de nuevas estructuras y modos de comportamiento en los procesos de desarrollo, aprendizaje y evolución.

Una segunda característica común a estos modelos de autoorganización es que se tratan de sistemas abiertos operando lejos del equilibrio. Es necesario un flujo constante de materia y energía a través del sistema para que tenga lugar la autoorganización. La sorprendente emergencia de nuevas estructuras y nuevos modos de comportamiento, que es el sello de la autoorganización, se da únicamente cuando el sistema está alejado del equilibrio.

La tercera característica de la autoorganización, común a todos los modelos, es la interconectividad no-lineal de los componentes del sistema. Esta pauta de no-linealidad se traduce físicamente en bucles de retroalimentación, y es descrita matemáticamente en términos de ecuaciones no-lineales.

Resumiendo estas tres características de los sistemas autoorganizadores, podemos decir que autoorganización es la aparición espontánea de nuevas estructuras y nuevos modos de comportamiento en sistemas lejos del equilibrio, caracterizada por bucles de retroalimentación internos y descrita matemáticamente en términos de ecuaciones no-lineales.

ESTRUCTURAS DISIPATIVAS

La primera y quizás más influyente descripción detallada de los sistemas autoorganizadores fue la teoría de las «estructuras disipativas» de Ilya Prigogine, químico y físico ruso de nacimiento, premio Nobel y profesor de química física en la Universidad Libre de Bruselas. Prigogine desarrolló su teoría a partir de estudios de sistemas físicos y químicos pero, según sus propios recuerdos, se vio impulsado a ello tras ponderar la naturaleza de la vida:

Estaba muy interesado en el problema de la vida (...). Siempre pensé que la existencia de vida nos dice algo muy importante sobre la naturaleza.[22]

Lo que más intrigaba a Prigogine, era que los organismos vivos fuesen capaces de mantener sus procesos vitales bajo condiciones de no-equilibrio. Quedó fascinado por sistemas alejados del equilibrio térmico e inició una exhaustiva investigación para averiguar exactamente qué condiciones precisas de desequilibrio pueden ser estables.

El descubrimiento crucial se produjo para Prigogine a principios de los años sesenta, cuando se dio cuenta de que los sistemas que están lejos del equilibrio deben ser descritos por ecuaciones no-lineales. El claro reconocimiento de la relación entre «lejos del equilibrio» y «no-linealidad», abrió a Prigogine una vía de investigación que culminaría una década después en su teoría de la autoorganización.

En orden a resolver el puzzle de la estabilidad lejos del equilibrio, Prigogine no estudió los sistemas vivos, sino que se concentró en el fenómeno mucho más sencillo de la convección térmica conocido como la «inestabilidad de Bénard», considerado actualmente como un caso clásico de autoorganización. A principios de siglo, el físico francés Henri Bénard descubrió que el calentamiento de una fina capa de líquido puede originar estructuras extrañamente ordenadas. Cuando el líquido es uniformemente calentado desde abajo, se establece un flujo constante de calor, que se mueve desde el fondo hacia la parte superior. El líquido en sí mismo permanece en reposo y el calor se transmite únicamente por conducción. No obstante, si la diferencia de temperatura entre la parte superior y el fondo alcanza un determinado valor crítico, el flujo de calor es reemplazado por una convección térmica, en la que el calor es transmitido por el movimiento coherente de grandes cantidades de moléculas.

En este punto, aparece un muy sorprendente patrón ordenado de células hexagonales («colmena»), en el que el líquido caliente asciende por el centro de las células, mientras que el líquido más frío desciende por las paredes de las células (ver figura 5-1). El análisis detallado de Prigogine de estas «células de Bénard» demostró que, a medida que el sistema se aleja del equilibrio (es decir, de un estado de temperatura uniforme a través del líquido), alcanza un punto crítico de inestabilidad, en el que aparece el patrón hexagonal ordenado.[23]

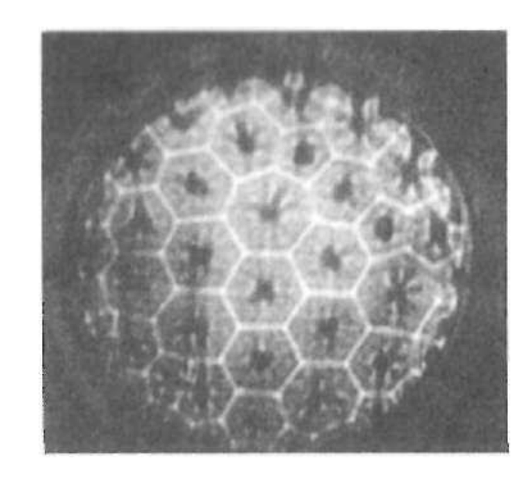


Figura 5-1
Patrón de células de Bénard hexagonales en un recipiente cilíndrico, visto desde arriba. El diámetro del recipiente es aproximadamente 10 cm y la profundidad del líquido 0,5 cm; de Bergé (1981).

La inestabilidad de Bénard es un espectacular ejemplo de aui<(organización. El desequilibrio mantenido por el flujo continuo de calor a través del sistema genera un complejo patrón espacial en el que millones de moléculas se mueven coherentemente para formar las células hexagonales de convección. Las células de Bénard además, no se limitan a los experimentos de laboratorio, sino que se dan en la naturaleza en un gran variedad de circunstancias. Por ejemplo, el flujo de aire caliente desde la superficie de la tierra hacia el espacio exterior puede generar vórtices hexagonales de circulación que dejan sus correspondientes huellas en las dunas del desierto y en los campos de nieve árticos.[24]

Otro sorprendente fenómeno de autoorganización estudiado extensivamente por Prigogine y sus colegas en Bruselas son los llamados «relojes químicos». Éstos son reacciones lejos del equilibrio químico, que producen oscilaciones periódicas muy sorprendentes.[25] Por ejemplo, si hay dos clases de moléculas en la reacción, unas «rojas» y otras «azules», el sistema será enteramente azul en un determinado punto, para cambiar luego súbitamente su color al rojo, después de nuevo al azul y así sucesivamente en intervalos regulares. Condiciones experimentales distintas podrán producir también ondas de actividad química (ver figura 5-2).

Para cambiar todo su color súbitamente, el sistema químico debe actuar como un todo, produciendo un alto nivel de orden a través de la actividad coherente de millones de moléculas. Prigo-

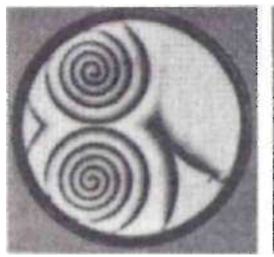




Figura 5-2
Actividad química ondulante en la llamada reacción Belousov-Zhabotinskii; de Prigogine (1980).

gine y sus colegas descubrieron que, como en la convección de Bénard, este comportamiento coherente emerge espontáneamente en puntos críticos de inestabilidad lejos del equilibrio.

Durante los años sesenta, Prigogine desarrolló una nueva termodinámica no-lineal para describir el fenómeno de la autoorganización en sistemas abiertos lejos del equilibrio. «La termodinámica clásica», explica, «conduce al concepto de "estructuras en equilibrio" tales como los cristales. Las células de Bénard son también estructuras, pero de muy distinta índole. Ésta es la razón por la que hemos introducido el concepto de "estructuras disipativas", para enfatizar la íntima relación, al principio paradójica, en dichas situaciones, entre estructura y orden por un lado y disipación... por el otro.»[26] En termodinámica clásica, la disipación de energía en transferencia de calor, fricción y demás, se asociaba siempre con pérdida. El concepto de Prigogine de estructuras disipativas introdujo un cambio radical en esta visión, demostrando que en los sistemas abiertos, la disipación es una fuente de orden.

En 1967 Prigogine presentó su concepto de estructuras disipativas por primera vez en un simposium Nobel en Estocolmo,[27] y cuatro años después, publicaba la primera formulación de la teoría completa junto con su colega Paul Glansdorff.[28] Según esta teoría, las estructuras disipativas no sólo se mantienen en un estado estable lejos del equilibrio, sino que pueden incluso evolucionar. Cuando el flujo de materia y energía a través de ellas aumenta, pueden pasar por nuevas inestabilidades y transformarse en nuevas estructuras de incrementada complejidad.

El análisis detallado de Prigogine de estos sorprendentes fenómenos demostró que, mientras las estructuras disipativas reciben su energía del exterior, las inestabilidades y saltos a nuevas formas de organización son el resultado de fluctuaciones inter-

nas, amplificadas por bucles de retroalimentación positiva. Así, la amplificación de la retroalimentación expansiva, que había sido tradicionalmente contemplada como destructiva en cibernética, aparece como fuente de un nuevo orden y complejidad en la teoría de las estructuras disipativas.

TEORÍA LÁSER

Al principio de los años sesenta, al mismo tiempo en que Ilya Prigogine descubría la crucial importancia de la no-linealidad para la descripción de los sistemas autoorganizadores, el físico Herman Haken en Alemania llegaba a una conclusión muy similar en su estudio de la física de los láseres, que acababan de ser inventados. En un láser, se combinan ciertas circunstancias especiales para producir una transición de luz normal de lámpara, que consiste en una mezcla «incoherente» (desordenada) de ondas luminosas de diferentes frecuencias y fases, a luz láser «coherente», consistente en una única, continua y monocromática serie de ondas.

La alta coherencia de la luz láser se debe a la coordinación entre las emisiones luminosas de los átomos individuales del láser.

Haken descubrió que esta emisión coordinada, que origina la aparición espontánea de coherencia u orden, es un proceso de autoorganización y que es necesaria una teoría no-lineal para describirlo adecuadamente. «En aquellos días mantuve muchas discusiones con varios teóricos norteamericanos», recuerda Haken, «que estaban también trabajando en láseres pero con una teoría lineal y no se daban cuenta de que algo cualitativamente nuevo estaba ocurriendo.»[29]

Cuando el fenómeno láser fue descubierto, se interpretó como un proceso de amplificación, que Einstein había ya descrito en los primeros años de la teoría cuántica. Los átomos emiten luz al ser «excitados», es decir, cuando sus electrones han sido ascendidos a órbitas superiores. Al cabo de un tiempo, los electrones descienden espontáneamente a órbitas inferiores y en el proceso emiten energía en forma de pequeñas ondas lumínicas. Un rayo de luz ordinaria consiste en una mezcla incoherente de estas minúsculas ondas emitidas por átomos individuales.

Bajo especiales circunstancias, no obstante, una onda luminosa pasante puede «estimular» -o como Einstein decía, «inducir»- a un átomo excitado a emitir su energía de tal modo que la onda de luz se amplifique. Esta onda amplificada puede, a su vez, estimular

a otro átomo a amplificarla aún más, hasta que finalmente, se produzca una avalancha de amplificaciones. El fenómeno resultante recibe el nombre de «amplificación de la luz a través de emisión estimulada de radiación», lo que dio origen a las siglas LASER.*

El problema de esta definición es que diferentes átomos en el material del láser generarán simultáneamente diferentes avalanchas de luz que serán incoherentes entre sí. ¿Qué hacen entonces -se preguntaba Haken- estas ondas desordenadas para combinarse y producir un flujo único y coherente? Halló el camino hacia la respuesta gracias a la observación de que un láser es un sistema multiparticular lejos del equilibrio térmico.[30] Necesita ser «bombeado» desde el exterior para la excitación de los átomos, que entonces irradian energía. Hay pues un flujo constante de energía a través del sistema.

Mientras estudiaba intensamente este fenómeno durante los años sesenta, Haken descubrió varios paralelismos con otros sistemas alejados del equilibrio, lo que le llevó a especular que la transición de luz normal a luz láser podía ser un ejemplo de los procesos de autoorganización típicos de los sistemas lejos del equilibrio.[31]

Haken acuñó el término «sinergética» para indicar la necesidad de un nuevo campo de estudio sistemático de dichos procesos, en los que las acciones combinadas de múltiples partes individuales, como los átomos de un láser, producen un comportamiento coherente del todo. En una entrevista concedida en 1985, Haken explicaba:

> En física, existe el término «efectos cooperativos», pero se usa principalmente para sistemas en equilibrio térmico (...). Pensé que debía acuñar un término para la cooperación [en] sistemas alejados del equilibrio térmico (...). Deseaba enfatizar que necesitamos una nueva disciplina para tales procesos (...). Así podríamos ver a la sinergética como la ciencia que trata, quizás no exclusivamente, el fenómeno de la autoorganización.[32]

En 1970, Haken publicaba su completa teoría no-lineal láser en la prestigiosa enciclopedia física alemana *Handbuch der Phisik.*[33] Tratando al láser como un sistema autoorganizador alejado del equilibrio, demostraba que la acción láser se produce cuando

* En el original, *Light Amplification through Stimulated Emission of Radiation* (las mayúsculas y el subrayado son añadidos). *(N. del T.)*

la intensidad del bombeo exterior alcanza un cierto valor crítico. Debido a la especial disposición de espejos en ambos extremos de la cavidad del láser, sólo la luz emitida muy cerca de la dirección del eje principal de éste puede permanecer en la cavidad por tiempo suficiente para producir el proceso de amplificación, mientras que todas las restantes series de ondas son eliminadas.

La teoría de Haken deja claro que, si bien el láser precisa de un enérgico bombeo desde el exterior para permanecer en un estado lejos del equilibrio, la coordinación de emisiones es producida por la propia luz láser; se trata pues de un proceso de autoorganización. Haken llegaba así independientemente a una descripción precisa de un fenómeno de autoorganización de la clase que Prigogine llamaría una estructura disipativa.

Las predicciones de la teoría láser han sido verificadas en gran detalle y gracias al trabajo pionero de Hermann Haken, el láser se ha convertido en una importante herramienta para el estudio de la autoorganización. En un simposium en honor de Haken en ocasión de su sexagésimo aniversario, su colaborador Robert Graham rendía así homenaje a su trabajo:

> Una de las grandes contribuciones de Haken ha sido el reconocimiento de los láseres no sólo como herramientas tecnológicas extremadamente útiles, sino también como sistemas físicos interesantes por sí mismos, capaces de enseñarnos lecciones importantes (...). Los láser ocupan un espacio muy interesante entre los mundos cuántico y clásico y la teoría de Haken nos dice cómo estos mundos pueden ser conectados (...). El láser puede situarse en la encrucijada entre física cuántica y clásica, entre los fenómenos en equilibrio y en no-equilibrio, entre las transiciones de fase y la autoorganización y entre la dinámica ordinaria y la del caos. Al mismo tiempo, es un sistema que podemos comprender a la vez en los niveles microscópico-cuántico-mecánico y clásico-macroscópico. Es un firme terreno para el descubrimiento de conceptos generales de física del no-equilibrio.[34]

HYPERCICLOS

Mientras que Prigogine y Haken llegaron al concepto de autoorganización a través del estudio de sistemas físicos y químicos que atraviesan puntos de inestabilidad y generan nuevas formas

de orden, el bioquímico Manfred Eigen utilizó el mismo concepto para arrojar luz sobre el rompecabezas del origen de la vida, Según la teoría darwiniana corriente, los organismos vivos se formarían desde el «caos molecular» a través de mutaciones aleatorias y selección natural. No obstante, se ha señalado a menudo que la probabilidad de que aparezan incluso simples células de este modo durante la edad conocida de la Tierra es cada vez más remota.

Manfred Eigen, premio Nobel de Química y director del Instituto Max Planck de Química Física de Göttingen, propuso a principios de los setenta que el origen de la vida sobre la Tierra podría ser el resultado de un proceso de organización progresiva en sistemas químicos alejados del equilibrio, involucrando «hiperciclos» de bucles de retroalimentación múltiples. Eigen, en efecto, postulaba una fase prebiológica de evolución, en la que los procesos de selección ocurrirían en el ámbito molecular «como propiedad material inherente en sistemas de reacciones especiales»,[35] y acuñaba el término «autoorganización molecular» para describir estos procesos evolutivos prebiológicos.[36]

Los sistemas de reacciones especiales estudiados por Eigen son conocidos como «ciclos catalíticos». Un catalizador es una substancia que incrementa el nivel de una reacción química, sin cambiar en sí mismo durante el proceso.

Las reacciones catalíticas son procesos cruciales en la química de la vida. Los catalizadores más comunes y eficientes son los enzimas, componentes celulares esenciales que promueven procesos metabólicos vitales.

Cuando en los años sesenta Eigen y sus colegas estudiaban las reacciones catalíticas incluyendo enzimas, observaron que en los sistemas bioquímicos alejados del equilibrio, por ejemplo los sistemas expuestos a flujos de energía, se combinan diferentes reacciones catalíticas para formar redes complejas que pueden contener bucles cerrados. La figura 5-3 muestra un ejemplo de una de estas redes catalíticas, en la cual quince enzimas catalizan sus mutuas reacciones, de modo que se forma un bucle cerrado o reacción catalítica.

Estos ciclos catalíticos son el centro de los sistemas químicos autoorganizadores tales como los relojes químicos, estudiados por Prigogine, y tienen también un papel esencial en las (unciones metabólicas de los organismos vivos. Son notablemente estables y pueden persistir bajo un amplio abanico de condiciones.[37] Eigen descubrió que, con el tiempo suficiente y un flujo continuo

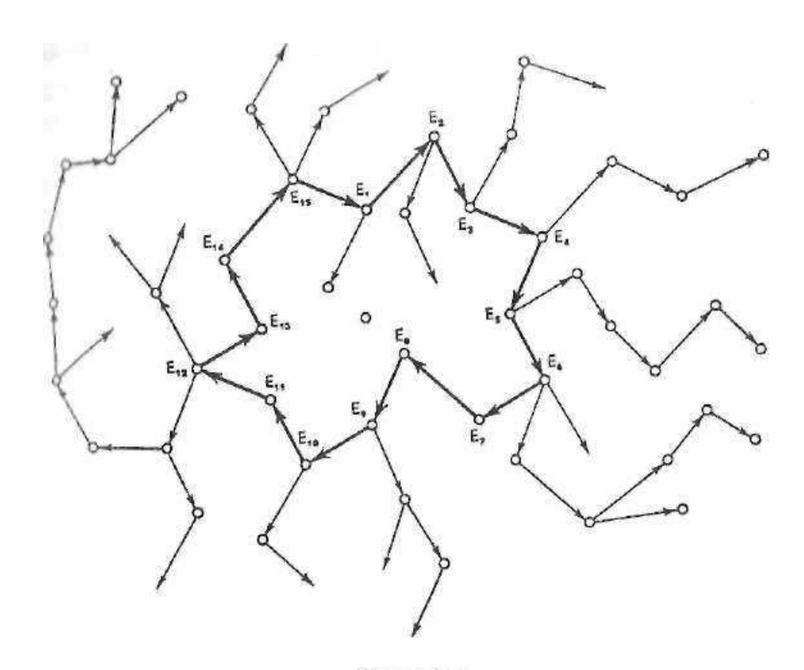


Figura 5-3
Una red catalítica de enzimas, incluyendo un bucle cerrado (E1...E15); de Eigen (1971).

de energía, los ciclos catalíticos tienden a entrelazarse para formar bucles cerrados en los que los enzimas producidos en un ciclo actúan como catalizadores del ciclo subsiguiente. Acuñó el término «hyperciclos» para tales bucles, en los que cada vínculo es un ciclo catalítico.

Los hyperciclos resultan ser no sólo notablemente estables, sino capaces de autorreproducirse exactamente y de corregir errores de reproducción, lo que significa que pueden conservar y transmitir información compleja. La teoría de Eigen demuestra que esta autorréplica -bien conocida en los organismos vivos- puede haber ocurrido en sistemas químicos antes de que apareciera la vida, con anterioridad a la formación de la estructura genética. Estos hyperciclos químicos serían pues sistemas autoorganizadores que no pueden ser denominados «vivos», por carecer de algunas características clave para la vida, pero que no obstante deben ser vistos como precursores de los sistemas vivos. Según esto, la vida tendría sus raíces profundas en el reino de la materia muerta.

Una de las más notables propiedades emuladoras de vida de

los hyperciclos es que son capaces de evoluciona]ˉ pasando por inestabilidades y creando sucesivos niveles más elevados de organización, que se caracterizan por una diversidad creciente y una gran riqueza de componentes y estructuras.[38] Eigen señala que los nuevos hyperciclos así creados pueden competir por la selección natural y se refiere explícitamente a la teoría de Prigogine para describir todo el proceso: «La ocurrencia de una mutación con ventaja selectiva corresponde a una inestabilidad, lo que puede ser explicado con la ayuda de la teoría]... de Prigogine y Glansdorff.»[39]

La teoría de los hyperciclos de Manfred Eigen comparte con la de las estructuras disipativas de Ilya Prigogine y con la teoría láser de Hermann Haken los mismos conceptos clave de autoorganización: el estado de alejamiento del equilibrio del sistema, el desarrollo de procesos de amplificación mediante bucles de retroalimentación positiva y la aparición de inestabilidades que conducen a la creación de nuevas formas de organización. Además, Eigen dio el paso revolucionario de adoptar un planteamiento darwiniano para describir los fenómenos de evolución en el nivel prebiológico y molecular.

AUTOPOIESIS: LA ORGANIZACIÓN DE LO VIVO

Los hyperciclos estudiados por Eigen se autoorganizan, se autorreproducen y evolucionan, pero aun así dudamos en denominar «vivos» a estos ciclos de reacciones químicas. ¿Qué propiedades, pues, debe poseer un sistema para poder ser considerado verdaderamente vivo? ¿Podemos establecer una clara distinción entre sistemas vivos y no vivos? ¿Cuál es la conexión precisa entre autoorganización y vida?

Estas eran las cuestiones que el neurocientífico chileno Humberto Maturana se planteaba durante los años sesenta. Tras seis años de estudio e investigación en biología en Inglaterra y Estados Unidos, donde colaboró con el grupo de Warren McCulloch en el MIT* y se vio fuertemente influenciado por la cibernética, Maturana regresó a la Universidad de Santiago en 1960. Allí se especializó en neurociencia, y en particular, en el estudio de la percepción del color.

Dos cuestiones capitales cristalizaron en la mente de Maturana como consecuencia de su investigación, como él mismo recuerda: «Entré en una situación en la que mi vida académica quedó dividida y me orienté hacia la búsqueda de respuestas a dos cuestiones que parecían conducir en direcciones opuestas, a saber: "¿Cuál es la organización de lo vivo?" y "¿Qué sucede en el fenómeno de la percepción?"»[40]

*Massachusetts Instituto of Technology. *(N. del T.)*

Maturana se debatió con estas cuestiones durante casi una década y su rasgo genial consiste en haber hallado una respuesta común a ambas. Al conseguirlo, hizo posible la unificación de dos tradiciones de pensamiento sistémico que habían estado dedicadas al estudio de fenómenos desde los dos lados de la división cartesiana. Mientras los biólogos organicistas habían explorado la naturaleza de la forma biológica, los cibernéticos intentaban comprender la naturaleza de la mente. Maturana se dio cuenta a finales de los años sesenta de que la clave de ambos puzzles estaba en la comprensión de la «organización de lo vivo».

En el otoño de 1986, Maturana fue invitado por Heinz von Foerster a incorporarse a su grupo interdisciplinario de investigación en la Universidad de Illinois y a participar en un simposium sobre cognición en Chicago unos meses después. Ello le brindó una oportunidad ideal para presentar sus ideas sobre la congnición como fenómeno biológico.[41] ¿Cuál era la idea central de Maturana? En sus propias palabras:

> Mis investigaciones sobre la percepción del color me llevaron a un descubrimiento que resultó extraordinariamente importante para mí: el sistema nervioso opera como una red cerrada de interacciones, en la que cada cambio de las relaciones interactivas entre ciertos componentes, resulta siempre un cambio de las relaciones interactivas de los mismos o de otros componentes.[42]

De este descubrimiento Maturana sacó dos conclusiones, que a su vez le brindaron las respuestas a sus dos cuestiones principales. Partió de la hipótesis de que la «organización circular» del sistema nervioso es la organización básica de todos los organismos vivos: «Los sistemas vivos (...) [están] organizados en un proceso causal circular cerrado, que permite el cambio evolutivo de modo que la circularidad sea mantenida, pero que no admite la pérdida de dicha circularidad.»[43]

Puesto que todos los cambios en el sistema se desarrollan dentro de esta circularidad básica, Maturana argumentaba que

los componentes que especifican la organización circular también deben ser producidos y mantenidos por ésta, llegando a la conclusión de que dicho patrón de organización, en el que la función de cada componente es ayudar a producir y transformar a otros componentes, manteniendo al mismo tiempo la circularidad global de la red, debía ser la fundamental «organización de lo vivo».

La segunda conclusión que Maturana sacó de la disposición circular cerrada del sistema nervioso desembocó en una comprensión de la cognición radicalmente nueva. Postulaba que el sistema nervioso no es solamente autoorganizador sino también autorreferente, de modo que la percepción no puede ser contemplada como la representación de una realidad externa, sino que debe ser entendida como la creación continua de nuevas relaciones en el interior de la red neuronal: «Las actividades de las células nerviosas no reflejan un entorno independiente del organismo vivo y por lo tanto, no permiten la construcción de un mundo existente de un modo absolutamente externo.»[44]

Según Maturana, la percepción y de modo más general la cognición no *representan* una realidad externa, sino que más bien la *especifican* a través de los procesos del sistema nervioso de organización circular. Desde esta premisa, Maturana dio luego el paso radical de postular que el proceso de organización circular en sí mismo -con o sin sistema nervioso- es idéntico al proceso de cognición:

> Los sistemas vivos son sistemas cognitivos y el proceso de vivir es un proceso de cognición. Esta afirmación es válida para todos los organismos, tengan o no sistema nervioso.[45]

Este modo de identificar la cognición con los procesos vitales mismos es ciertamente una concepción radicalmente nueva. Sus implicaciones son de largo alcance y serán analizadas en detalle en las próximas páginas.[46]

Tras publicar sus ideas en 1970, Maturana inició una larga colaboración con Francisco Varela, un neurocientífico más joven de la Universidad de Santiago que había sido alumno suyo antes de convertirse en su colaborador. Según Maturana, esta colaboración empezó cuando Varela le desafió en una conversación a hallar una descripción más formal y completa para el concepto de organización circular.[47] Se pusieron de inmediato a trabajar en el desarrollo de una descripción verbal completa de la

¡idea de Maturana antes de Intentar la construcción de un modelo matemático, y para ello empezaron por darle un nuevo nom---: *autopoiesis.*

Auto, por supuesto, significa «sí mismo» y se refiere a la autonomía de los sistemas autoorganizadores. *Poiesis,* que tiene la misma raíz griega que «poesía», significa «creación». Así pues, *autopoiesis* significa «creación de sí mismo». Puesto que habían acuñado una nueva palabra sin historia, resultaba fácil utilizarla como un término técnico para la organización distintiva de los sistemas vivos. Dos años antes, Maturana y Varela habían publicado su primera descripción de la autopoiesis en un extenso ensayo,[48] y ya por 1974, junto con su colega Ricardo Uribe, habían desarrollado un modelo matemático para el sistema autopoiésico más simple: la célula viva.[49]

Maturana y Varela empezaban su ensayo sobre autopoiesis definiendo su enfoque como «mecanicista», para distinguirlo de los planteamientos vitalistas sobre la naturaleza de la vida: «Nuestro enfoque será mecanicista: no invocaremos fuerzas o principios que no se encuentren en el universo físico.» No obstante, la próxima frase deja inmediatamente claro que los autores no son mecanicistas cartesianos, sino pensadores sistémicos:

> No obstante, nuestro objetivo de estudio es la organización viva y, por tanto, nuestro interés no se centrará en las propiedades de los componentes, sino en los procesos y relaciones entre los procesos realizados entre componentes.[50]

Siguen luego refinando su posición con la importante distinción entre «organización» y «estructura», que ha sido un tema implícito a lo largo de toda la historia del pensamiento sistémico, no tratado explícitamente hasta el desarrollo de la cibernética.[51] Maturana y Varela dejan la distinción cristalinamente clara. La organización en un sistema vivo, explican, es un conjunto de relaciones entre sus componentes que caracteriza el sistema como perteneciente a una clase determinada: bacteria, girasol, gato o cerebro humano. La descripción de dicha organización es una descripción abstracta de relaciones y no identifica a los componentes. Los autores asumen que la autopoiesis es un patrón general de organización común a todos los sistemas vivos, cualquiera que sea la naturaleza de sus componentes.

La estructura de un sistema está constituida en cambio por las propias relaciones entre los componentes físicos. En otras pa-

labras, la estructura del sistema es la manifestación física de su organización. Maturana y Varela enfatizan que la organización del sistema es independiente de las propiedades de sus componentes, de modo que una determinada organización puede ser encarnada de muy distintas maneras por muy distintas clases de componentes.

Una vez aclarado que su objetivo es la organización y no la estructura, los autores proceden a definir la autopoiesis, la organización común a todos los sistemas vivos. Se trata de una red de procesos de producción, en la que la función de cada componente es participar en la producción o transformación de otros componentes de la red. De este modo toda la red se «hace a sí misma» continuamente. Es producida por sus componentes y, a su vez, los produce. «En un sistema vivo», explican los autores, «el producto de su operación es su propia organización.»''[2]

Una importante característica de los sistemas vivos es que su organización autopoiésica incluye la creación de un perímetro que especifica el territorio de las operaciones de la red y define el sistema como una unidad. Los autores señalan que los ciclos catalíticos en particular no constituyen sistemas vivos ya que sus fronteras están determinadas por factores ajenos al proceso catalítico, por ejemplo, el recipiente físico en que tienen lugar.

Resulta también interesante observar que el físico Geoffrey Chew formuló su denominada hipótesis *bootstrap** sobre la composición e interacciones de las partículas subatómicas, muy parecida al concepto de autopoiesis, aproximadamente una década antes de que Maturana publicara sus ideas por primera vez.[53] Según Chew, partículas fuertemente interactivas o «hadrones», forman una red de interacciones en la que «cada partícula ayuda a generar otras partículas, que a su vez la generan»."[14]

Hay no obstante dos diferencias clave entre el hadron *bootstrap* y la autopoiesis. Los hadrones son «estados ligados de energía»** potenciales en relación unos con otros, en el sentido probabilístico de la teoría cuántica, lo que no es de aplicación a la

* Reproduzco aquí literalmente la excelente nota aclaratoria que Graciela de Luis, traductora al castellano de *El punto crucial* de Fritjof Capra, incluía en el capítulo 3 de dicha obra:

«La teoría denominada *bootstrap* (alusión en inglés a uno de los disparates del barón de Munchhausen, al pretender elevarse tirando de los cordones de sus propias botas) deja entrever que las partículas que electivamente existen en la naturaleza estarían compuestas unas por otras "cerrándose" el proceso sobre sí mismo.» *(N. del T.)*

** En el original, *bound states (N. del T.}*

«organización de lo vivo» de Maturana. Además, una red de partículas subatómicas interactuando a través de colisiones de alta energía no puede ser considerada autopoiésica ya que no forma frontera alguna.

De acuerdo con Maturana y Varela, el concepto de autopoiesis es necesario y suficiente para caracterizar la organización de los sistemas vivos. No obstante, esta caracterización no incluye información alguna sobre la constitución física de los componentes del sistema. Para entender las propiedades de éstos y de sus interacciones físicas, la descripción abstracta de su organización debe ser completada con una descripción de la estructura del sistema en lenguaje físico y químico. La clara distinción entre estas dos descripciones -una en términos de estructura y la otra en términos de organización- hace posible la integración de modelos de autoorganización orientados a la estructura (como los utilizados por Prigogine y Haken) y de modelos orientados a la organización (como los empleados por Eigen, Maturana y Varela) en una teoría coherente de los sistemas vivos.[55]

GAIA, LA TIERRA VIVA

Las ideas clave subyacentes en los diversos modelos de sistemas autoorganizadores descritos cristalizaron en poco tiempo hacia principios de los sesenta. En Estados Unidos, Heinz von Foerster reunía su grupo interdisciplinario de investigación y pronunciaba varias conferencias sobre autoorganización. En Bélgica, Ilya Prigogine establecía el vínculo crucial entre sistemas en no-equilibrio y no-linealidad. En Alemania, Hermann Haken desarrollaba su teoría láser no-lineal y Manfred Eigen trabajaba en sus ciclos catalíticos, mientras que en Chile, Humberto Maturana lo hacía sobre la organización en los sistemas vivos.

Al mismo tiempo, el químico atmosférico James Lovelock tenía una intuición iluminadora que le conduciría a formular un modelo que es quizás la más sorprendente y hermosa expresión de autoorganización: ja idea de que el planeta Tierra, como un todo, es un sistema autoorganizador vivo.

Los orígenes de la atrevida hipótesis de Lovelock se remontan a los primeros tiempos del programa espacial de la NASA. Mientras que la idea de la Tierra viva es muy antigua y se han formulado en varias ocasiones teorías sobre el planeta como sistema

vivo,[56] los vuelos espaciales de principios de los años sesenta permitieron por primera vez a los seres humanos contemplar realmente nuestro planeta desde el espacio exterior y percibirlo como un todo integrado. Esta percepción de la Tierra en toda su belleza -un globo azul y blanco flotando en la profunda oscuridad del espacio-, emocionó vivamente a los astronautas y, como algunos han declarado posteriormente, fue una profunda experiencia espiritual que modificó para siempre su relación personal con ella.[57] Las magníficas fotografías de la Tierra completa que trajeron consigo proporcionaron el símbolo más poderoso para el movimiento de la ecología global.

Mientras que los astronautas contemplaban la Tierra y admiraba su belleza, su medioambiente era también examinado desde el espacio exterior por los sensores de instrumentos científicos, al igual que los de la Luna y los planetas más próximos. Durante los años sesenta, los programas espaciales de Rusia y Estados Unidos lanzaron más de cincuenta sondas espaciales, la mayoría para explorar la Luna, pero algunas destinadas a viajar más allá, hacia Venus o Marte.

Por aquel tiempo, la NASA invitó a James Lovelock a sus Laboratorios de Propulsión a Chorro de Pasadena, en California, para participar en el diseño de instrumentos para la detección de vida en Marte.[58] El plan de la NASA consistía en mandar un vehículo espacial que buscaría indicios de vida en el mismo lugar de aterrizaje, realizando una serie de experimentos con el suelo marciano. Mientras trabajaba en cuestiones técnicas de diseño del instrumental, Lovelock se hacía también una pregunta de carácter más general: ¿cómo podemos estar seguros de que el tipo de vida de Marte, en caso de existir, se nos revelará con tests basados en el tipo de vida de la Tierra? Durante los siguientes meses y años, esta pregunta le condujo a pensar profundamente en la naturaleza de la vida y en cómo reconocerla.

Analizando este problema, Lovelock llegó a la conclusión de que el hecho de que todos los organismos vivos tomen materia y energía y expulsen desechos, era la característica de vida más general que podía encontrar. De modo muy similar a Prigogine, pensó que debía ser posible expresar matemáticamente esta característica fundamental en términos de entropía, pero después su razonamiento progresó en otra dirección. Lovelock asumió que la vida en cualquier planeta necesitaría atmósfera y océanos como medio fluido para las materias primas y los desechos. En consecuencia, especuló, debería ser posible detectar de algún

modo la existencia de vida analizando la composición química de la atmósfera de un planeta. Así, de existir vida en Marte, su atmósfera debería revelar alguna composición de gases, alguna «firma» característica, que podría ser detectada incluso desde la Tierra.

Estas especulaciones se vieron confirmadas cuando Lovelock y su colega Dian Hitchcock iniciaron un análisis sistemático de la atmósfera marciana mediante observaciones realizadas desde la Tierra, comparándolo con un análisis similar de la atmósfera terrestre. Descubrieron que las composiciones químicas de ambas atmósferas son sorprendentemente distintas. Mientras que hay muy poco oxígeno, mucho dióxido de carbono (CO_2) y nada de metano en la atmósfera marciana, la de la Tierra contiene cantidades masivas de oxígeno, casi nada de carbono y mucho metano.

Lovelock se dio cuenta de que la razón del particular perfil atmosférico de Marte es que, en un planeta sin vida, todas las reacciones químicas posibles entre los gases de la atmósfera habían sido completadas mucho tiempo atrás. Hoy no son posibles nuevas reacciones químicas en Marte ya que existe un completo equilibrio químico en su atmósfera.

La situación en la Tierra es exactamente la contraria. La atmósfera terrestre contiene gases, como el oxígeno y el metano, muy capaces de reaccionar entre sí pero también de coexistir en altas proporciones, originando una mezcla de gases lejos del equilibrio químico. Lovelock se dio cuenta de que este estado especial debía ser consecuencia de la presencia de vida en la Tierra. Las plantas producen oxígeno constantemente, mientras que otros organismos producen otros gases, de modo que los gases atmosféricos son continuamente reaprovisionados mientras pasan por reacciones químicas. En otras palabras, Lovelock reconoció la atmósfera terrestre como un sistema abierto lejos del estado de equilibrio, caracterizado por un flujo constante de materia y energía. Su análisis químico identificaba el sello mismo de la vida.

Esta percepción fue tan trascendental para Lovelock, que recuerda aún el momento preciso en que ocurrió:

> La revelación de Gaia vino a mí súbitamente, como un relámpago de iluminación. Me encontraba en una pequeña habitación del piso superior de los Laboratorios de Propulsión a Chorro de Pasadena en California. Era el otoño de 1965... y es-

taba hablando con mi colega Dian Hitchcock sobre un documento que estábamos preparando... Fue en este momento en que vislumbré Gaia. Un pasmoso pensamiento vino a mí. La atmósfera terrestre es una extraordinaria e inestable mezcla de gases y, sin embargo, yo sabía que se mantenía constante en su composición durante largos períodos de tiempo. ¿Podía ser que la vida sobre la Tierra no sólo estuviese haciendo la atmósfera, sino que además la estuviese regulando, manteniéndola en una composición constante y a un nivel favorable para los organismos?[59]

El proceso de autorregulación es la clave de la idea de Lovelock. Sabía por los astrofísicos que el calor del Sol se ha incrementado en un 25 % desde el inicio de la vida sobre la Tierra y que, a pesar de dicho aumento, la temperatura en la superficie de la Tierra se ha mantenido constante, a un nivel confortable para la vida, durante estos cuatro mil millones de años. ¿Y si la Tierra fuese capaz de regular su temperatura -se preguntó- así como otras condiciones planetarias (la composición de su atmósfera, la salinidad de sus océanos, etc.), al igual que los organismos vivos son capaces de autorregularse y mantener constante su temperatura corporal y otras variables vitales? Lovelock se dio cuenta de que su hipótesis equivalía a una ruptura radical con la ciencia convencional:

Considerad la teoría Gaia como una alternativa a la creencia convencional que ve la Tierra como un planeta muerto, hecho de rocas inanimadas, océanos y atmósfera, meramente habitado por vida. Consideradlo como un sistema real incluyendo toda su vida y todo su entorno, íntimamente acoplados para formar una entidad autorreguladora.[60]

A los científicos espaciales de la NASA, por cierto, no les agradó lo más mínimo el descubrimiento de Lovelock. Habían preparado un impresionante despliegue de experimentos de detección de vida para su misión Viking a Marte y ahora Lovelock les decía que, en realidad, no hacía falta mandar ningún vehículo espacial a buscar indicios de vida en el planeta rojo. Todo lo que necesitaban era un análisis espectral de la atmósfera marciana, que podía conseguirse fácilmente con un telescopio desde la Tierra. No es de extrañar que desoyesen la opinión de Lovelock y prosiguiesen con el programa Viking. Su vehículo espacial aterrizó en Marte

varios años después para, como Lovelock había predicho, no encontrar rastro alguno de vida.*

En 1969, en un encuentro científico en Princeton, Lovelock presentó por primera vez su hipótesis de la Tierra como un sistema autorregulador.[61] Poco después, un novelista amigo suyo, dándose cuenta de que la idea de Lovelock representaba el renacimiento de un poderoso mito antiguo, sugirió el nombre de «hipótesis Gaia» en honor de la diosa griega de la Tierra. Lovelock aceptó gustosamente la sugerencia y en 1972 publicaba la primera versión extensa de su idea en el trabajo titulado «Gaia vista desde la atmósfera.»[62]

Por aquel entonces, Lovelock no tenía idea de *cómo* la Tierra podía regular su temperatura y la composición de su atmósfera, exceptuando que sabía que los procesos autorreguladores debían involucrar organismos de la biosfera. Tampoco sabía qué organismos producían qué gases. Al mismo tiempo, no obstante, la microbióloga norteamericana Lynn Margulis estaba estudiando los mismos procesos que Lovelock necesitaba comprender: la producción y eliminación de gases por diversos organismos, incluyendo especialmente la miríada de bacterias del suelo terrestre. Margulis recuerda que se preguntaba sin cesar: «¿Por qué está todo el mundo de acuerdo en que el oxígeno atmosférico... proviene de la vida, pero nadie habla de los otros gases atmosféricos provenientes igualmente de la vida?»[63] Bien pronto, algunos colegas le recomendaron que hablase con James Lovelock, lo que dio origen a una larga y fructífera colaboración que desembocó en la completa y científica hipótesis Gaia.

Los antecedentes científicos y las respectivas áreas de experiencia de James Lovelock y Lynn Margulis demostraron ser una combinación ideal. Margulis estaba en condiciones de aclarar a Lovelock muchas cuestiones en relación con los orígenes biológicos de los gases atmosféricos, mientras que Lovelock aportaba conceptos de química, termodinámica y cibernética a la emergente teoría Gaia. Así, los dos científicos pudieron desvelar gradualmente una compleja red de bucles de retroalimentación que -supusieron- era la responsable de la autorregulación del planeta.

* Lovelock es un poco más explícito al respecto y en su vídeo «Gaia Theory» comenta cómo la NASA decidió prescindir de sus servicios al ver en peligro todo el volumen de negocio implícito en el programa Viking. Dados estos antecedentes, tampoco resulta sorprendente la dura campaña de crítica v ridiculización a la que se vio sometida la hipótesis Gaia en sus primeros años. *(N. del T.)*

La capacidad primordial de estos bucles de retroalimentación consiste en vincular sistemas vivos con sistemas no vivos. No podemos ya pensar en rocas, animales y plantas separadamente. La teoría Gaia demuestra que existe una íntima relación entre las partes vivas del planeta (plantas, microorganismos y animales) y las no vivas (rocas, océanos y atmósfera).

El ciclo del dióxido de carbono es un buen ejemplo para ilustrar este punto.[64] Los volcanes de la Tierra han estado enviando cantidades ingentes de dióxido de carbono a la atmósfera durante millones de años. Puesto que éste es uno de los principales gases de invernadero, Gaia necesita retirarlo de la atmósfera para que ésta no alcance una temperatura inhóspita para la vida. Los animales y las plantas reciclan cantidades masivas de oxígeno en sus procesos de respiración, fotosíntesis y descomposición. No obstante, estos intercambios se mantienen en equilibrio y no afectan al nivel de dióxido de carbono en la atmósfera. Según la teoría Gaia, el exceso de CO_2 en la atmósfera es absorbido y reciclado en un extenso bucle de retroalimentación que incluye la erosión de las rocas como elemento clave.

En el proceso de erosión de las rocas, éstas se combinan con el agua de lluvia y con el dióxido de carbono para formar diversos compuestos químicos, llamados carbonatos. El CO, es pues retirado de la atmósfera y disuelto en soluciones líquidas. Éstos son procesos puramente químicos, que no requieren la participación de organismos vivos. No obstante, Lovelock y otros descubrieron que la presencia de bacterias en el suelo incrementa ampliamente el nivel de erosión. En un sentido, estas bacterias del suelo actúan como catalizadores del proceso de erosión de las rocas, de modo que todo el ciclo del dióxido de carbono puede contemplarse como el equivalente biológico de los ciclos catalíticos estudiados por Manfred Eigen.

Los carbonatos son luego arrastrados a los océanos donde unas minúsculas algas, imperceptibles a simple vista, los absorben para construir sus delicadas cáscaras de carbonato cálcico. Así, el CO_2 que estaba en la atmósfera acaba convertido en cáscara de estas diminutas algas (figura 5-4). Éstas, además, absorben directamente dióxido de carbono del aire.

Cuando estas algas mueren, sus cáscaras se precipitan al fondo de los océanos, donde forman sedimentos masivos de piedra caliza (otra forma de carbonato cálcico). Debido a su enorme peso, estos sedimentos de caliza se hunden gradualmente en el manto terrestre donde se funden, llegando incluso a desencade-

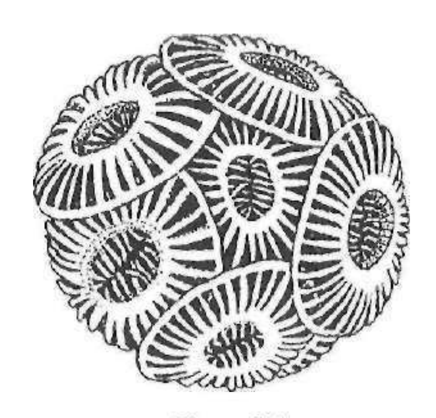


Figura 5-4
Alga oceánica (cocolitófera) con cáscara de carbono cálcico.

Figura 5-4
Alga oceánica (cocolitófera) con cáscara de carbono cálcico.

nar los movimientos de las placas tectónicas. En realidad, parte del CO_2 contenido en las rocas fundidas será reenviado a la atmósfera por los volcanes para iniciar otra vuelta en el gran ciclo de Gaia.

El ciclo entero -que vincula volcanes, erosión de rocas, bacterias del suelo, algas oceánicas, sedimentos de caliza y de nuevo volcanes- actúa como un gigantesco bucle de retroalimentación que contribuye a la regulación de la temperatura de la Tierra. A medida que el Sol aumenta su temperatura, la acción de las bacterias se ve estimulada, con lo que el proceso de erosión de las rocas se incrementa, lo que a su vez significa una mayor absorción del CO, de la atmósfera y el consecuente enfriamiento del planeta. Según Lovelock y Margulis, similares ciclos de retroalimentación -que comprenden plantas y rocas, animales y gases atmosféricos, microorganismos y océanos- regulan el clima de la Tierra, la salinidad de sus océanos y otras importantes constantes planetarias.

La teoría Gaia contempla la vida de un modo sistémico, uniendo geología, microbiología, química atmosférica y otras disciplinas, cuyos especialistas no están acostumbrados a comunicarse entre sí. Lovelock y Margulis desafiaron los conceptos establecidos de que éstas son disciplinas separadas, que las fuerzas de la geología marcan las condiciones para la vida sobre la Tierra y que animales y plantas son meros pasajeros que hallaron, por pura casualidad, las condiciones adecuadas para su evolución. Según la teoría Gaia, es la vida la que crea las condiciones aptas para su propia existencia. En palabras de Lynn Margulis:

Dicho simplemente, la hipótesis [Gaia] dice que la superficie de la Tierra, que siempre hemos considerado como el *entorno* de la vida, es en realidad *parte* de ésta. El manto de aire -la troposfera- debe ser considerado como un sistema circulatorio, producido y mantenido por la vida... Cuando los científicos nos dicen que la vida se adapta a un entorno esencialmente pasivo de química, física y rocas, están perpetuando una visión seriamente distorsionada. En realidad, la vida hace, conforma y cambia el entorno al que se adapta. Este entorno a su vez, retroalimenta a la vida que cambia, actúa y crece en él. Hay interacciones cíclicas constantes.[65]

Al principio, la resistencia de la comunidad científica ante esta nueva visión de la vida fue tan fuerte que a los autores les resultó imposible publicar su hipótesis. Publicaciones académicas establecidas, tales como *Science* y *Nature,* la rechazaron. Finalmente, el astrónomo Carl Sagan, editor de *Icarius,* invitó a Lovelock y Margulis a publicarla en su revista.[66] Resulta intrigante que, de todas las teorías y modelos de autoorganización, sea la teoría Gaia la que, con mucho, haya encontrado una mayor oposición. Resulta tentador considerar si tan irracional reacción por parte de la ciencia establecida pudiera tener su origen en la evocación de Gaia, el poderoso arquetipo mítico.

Efectivamente, la imagen de Gaia como un ser simiente fue el principal argumento implícito en el rechazo de la teoría Gaia tras su publicación. Los científicos lo expresaban proclamando que la hipótesis no podía ser científica ya que era ideológica, es decir, que implicaba la idea de los procesos naturales conformados por un propósito. «Ni Lynn Margulis ni yo hemos propuesto nunca que la autorregulación planetaria esté dotada de un propósito», protesta Lovelock. «No obstante, nos encontramos con la persistente, casi dogmática crítica de que nuestra hipótesis es teleológica.»[67]

Esta crítica recuerda el viejo debate entre mecanicistas y vitalistas. Mientras que los mecanicistas mantenían que todo fenómeno biológico podía en última instancia ser explicado en los términos de las leyes de la química y la física, los vitalistas postulaban la existencia de una entidad no física, un agente causal director de los procesos vitales que desafiaban las explicaciones mecanicistas.[68] La teleología -del griego *telos,* «propósito»- afirma que el agente causal postulado por los vitalistas es determinista, que hay designio y propósito en la naturaleza. En su encarnizada oposición a los argumentos vitalistas y teleológicos, los mecanicistas se debaten aún con la vieja metáfora de Dios como relojero. La actualmente emergente teoría de los sistemas vivos ha trascendido finalmente el debate entre mecanicistas y vitalistas. Como veremos, contempla la naturaleza viva como consciente e inteligente, sin necesidad de asumir un designio o propósito general.[69]

Los representantes de la biología mecanicista atacaron la hipótesis Gaia como teleológica porque no podían imaginar cómo la vida sobre la Tierra podía ser capaz de crear y regular las condiciones para su propia existencia sin hacerlo de un modo consciente y determinado. «¿Hay reuniones de comités en los que las especies negocian la temperatura del año siguiente?», preguntaban con malicioso humor.[70]

Lovelock respondió con un ingenuo modelo matemático llamado «El Mundo de las Margaritas»." Este modelo representa un sistema de Gaia enormemente simplificado, en el que queda totalmente claro que la regulación de la temperatura es una propiedad emergente del sistema que se manifiesta automáticamente, sin ninguna acción determinada, como consecuencia de los bucles de retroalimentación entre los organismos del planeta y su entorno.[71]

El Mundo de las Margaritas es un modelo informático de un planeta, calentado por un sol con radiación térmica constantemente creciente y poblado únicamente por dos especies: margaritas negras y margaritas blancas. Se reparten semillas de ambas por el planeta, que tiene humedad y fertilidad uniformes, si bien las margaritas sólo crecerán dentro de una determinada gama de temperaturas.

Lovelock programó su ordenador con las ecuaciones matemáticas correspondientes a estas tres condiciones, escogió un planeta en el punto de congelación como situación inicial y puso el ordenador a trabajar sobre el modelo. «¿Conducirá la evolución del ecosistema del Mundo de las Margaritas a la autorregulación de su clima?», era la cuestión crucial que se preguntaba.

El resultado fue espectacular. A medida que el planeta modelo se calienta, en un momento determinado el ecuador alcanza la temperatura adecuada para la vida de la planta. Las margaritas negras aparecen primero ya que absorben mejor el calor que las blancas y están por tanto mejor dotadas para la supervivencia y la reproducción. Así, en su primera fase de evolución el planeta muestra un anillo de margaritas negras sobre el ecuador (figura 5-5).

* En el original *Daisyworld. (N. del T.)*

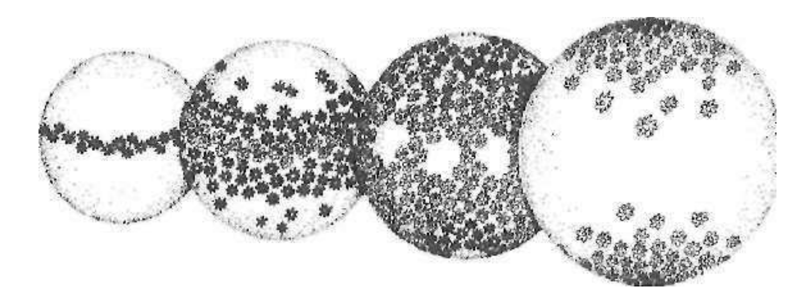


Figura 5-5
Las cuatro fases evolutivas del Mundo de las Margaritas.

A medida que el planeta se calienta, el ecuador se vuelve demasiado cálido para las margaritas negras, que empiezan a colonizar las zonas subtropicales. Al mismo tiempo, las margaritas blancas aparecen sobre el ecuador. Debido a su color, las margaritas blancas reflejan el calor y se enfrían, lo que les permite sobrevivir en zonas demasiado calurosas para sus hermanas negras. Así pues, en la segunda fase hay un anillo de margaritas blancas sobre el ecuador, mientras que las zonas subtropicales templadas se llenan de margaritas negras y en los polos, donde hace aún demasiado frío, no aparecen todavía margaritas.

El sol sigue aumentando su radiación y las plantas se extinguen en el ecuador, donde hace ahora demasiado calor incluso para las margaritas blancas. Mientras tanto, las margaritas negras han ido siendo reemplazadas por blancas en las zonas templadas y en los polos empiezan a aparecer margaritas negras. Así, la tercera fase muestra un planeta con el ecuador despoblado, las zonas templadas pobladas por margaritas blancas, las zonas alrededor de los polos por margaritas negras y los casquetes polares sin plantas. En la cuarta fase, vastas regiones alrededor del ecuador y de las zonas subtropicales son ya demasiado calurosas para ambas clases de margaritas, mientras que vemos margaritas blancas en las zonas templadas y negras en los polos. Finalmente, todo el planeta es ya demasiado caluroso para las margaritas y la vida se extingue.

Ésta es la dinámica básica del sistema del Mundo de las Margaritas. La propiedad crucial del modelo que produce la autorregulación es que las margaritas negras, al absorber calor, no sólo se calientan a sí mismas, sino también al planeta. De forma parecida, mientras las margaritas blancas reflejan el calor y se refrescan a sí mismas, refrescan también al planeta. Así, el calor es absorbido y reflejado a través de la evolución del modelo, dependiendo de qué especie de margarita esté presente.

Cuando Lovelock trazó las gráficas de los cambios de temperatura del planeta a través de su evolución, se encontró con el sorprendente resultado de que la temperatura planetaria se mantenía constante a lo largo de las cuatro fases (figura 5-6). Cuando el sol es relativamente frío, el modelo incrementa su propia temperatura mediante la absorción de calor a cargo de las margaritas negras. A medida que el sol aumenta su radiación, la temperatura del modelo desciende gradualmente a causa del progresivo predominio de margaritas blancas que reflejan el calor. Así, el Mundo de las Margaritas, sin ningún plan preconcebido ni previsión alguna, «regula su temperatura durante un largo período de tiempo, gracias al baile de las margaritas».[72]

Los bucles de retroalimentación que ligan las influencias medioambientales con el crecimiento de las margaritas, que a su vez afecta al entorno, son la prestación esencial del modelo. Cuando este ciclo se rompe, de modo que no hay influencia de las margaritas sobre el entorno, su población fluctúa arbitrariamente y todo el sistema se vuelve caótico. Tan pronto como los bucles se cierran mediante el restablecimiento del vínculo entre las margaritas y el entorno, el modelo se estabiliza y se reanuda la autorregulación.

Desde entonces, Lovelock ha diseñado versiones mucho más sofisticadas del Mundo de las Margaritas en las que, en lugar de dos únicas especies, hay muchas clases de margaritas con pigmentos variables. Hay modelos en que las margaritas evolucionan y cambian de color, modelos con conejos que se comen las margaritas y zorros que se comen los conejos etc.[73] El resultado final de estos modelos altamente complejos, es que se atenúan las pequeñas fluctuaciones térmicas que aparecían en el modelo original y que la autorregulación se hace más y más estable a medida que aumenta la complejidad del sistema. Lovelock introdujo además en sus modelos catástrofes que destruyen periódicamente un 30 % ciento de las margaritas y descubrió que la autorregulación del modelo se muestra notablemente resistente ante estas severas perturbaciones.

Todos estos modelos han generado vivas discusiones entre biólogos, geofísicos y geoquímicos y, desde su primera publicación, la hipótesis Gaia ha ido ganando respeto en la comunidad científica. De hecho, hay ahora varios equipos de investigación en distintas partes del mundo trabajando en formulaciones detalladas de la teoría Gaia.[74]

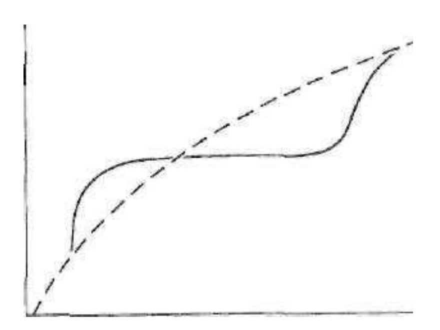


Figura 5-6
Evolución de la temperatura en el Mundo de las Margaritas: La línea de trazos muestra el aumento de temperatura en ausencia de vida. La línea continua muestra cómo la vida mantiene la temperatura constante; de Lovelock (1991).

UNA PRIMERA SÍNTESIS

A finales de los años setenta, casi veinte años después de que los criterios claves de la autoorganización fuesen descubiertos en varios contextos, habían sido formulados modelos y teorías matemáticos detallados de sistemas autoorganizadores, que habían puesto de manifiesto una serie de características comunes: el flujo continuo de materia y energía a través del sistema, el estado estable lejos del equilibrio, la aparición de nuevos patrones de orden, el papel central de los bucles de retroalimentación y la descripción matemática en términos de ecuaciones no-lineales.

Al mismo tiempo, el físico austríaco Erich Jantsch, por aquel entonces en la Universidad de California en Berkeley, presentaba una primera síntesis de los nuevos modelos en un libro titulado *The Self-Organizing Universe* (El universo autoorganizador), que se basaba fundamentalmente en la teoría de estructuras disipativas de Prigogine.[75] Si bien el libro de Jantsch ha quedado ya desfasado, al haber sido escrito antes de que las nuevas matemáticas de la complejidad fueran ampliamente conocidas y no incluir el concepto pleno de autopoiesis como organización de sistemas vivos, fue de gran valor en su tiempo. Fue el primer libro que puso el trabajo de Prigogine al alcance del gran público y que intentaba integrar un gran número de conceptos e ideas, por aquel entonces muy novedosos, en un paradigma coherente de autoorganización. Mi propia síntesis de estos conceptos en el presente libro es, de algún modo, una reformulación del trabajo previo de Erich Jantsch.

6. LAS MATEMÁTICAS DE LA COMPLEJIDAD

La visión de los sistemas vivos como redes auloorganizadoras, cuyos componentes están interconectados y son interdependientes, ha sido expresada repetidamente, de uno u otro modo, a lo largo de la historia de la filosofía y de la ciencia. No obstante, modelos detallados de sistemas autoorganizadores sólo han podido ser formulados recientemente, cuando se ha accedido a nuevas herramientas matemáticas, capaces de permitir a los científicos el diseño de modelos de la inlerconectividad no-lineal característica de las redes. El descubrimiento de estas nuevas «matemáticas de la complejidad» está siendo cada vez más reconocido como uno de los acontecimientos más importantes de la ciencia del siglo xx.

Las teorías y modelos de autoorganización descritos en las páginas precedentes tratan con sistemas altamente complejos que comprenden miles de reacciones químicas interdependientes. A lo largo de las tres últimas décadas, ha aparecido un nuevo conjunto de conceptos y técnicas para tratar con esta enorme complejidad, conjunto que ha empezado a formar un marco matemático coherente. No existe aún un nombre definitivo para estas matemáticas. Se conocen popularmente como «matemáticas de la complejidad» y técnicamente como «teoría de los sistemas dinámicos», «dinámica sistemática», «dinámica compleja» o «dinámica no-lineal». El término «teoría de los sistemas dinámicos» es quizás el más usado.

Para evitar la confusión, resulta conveniente recordar que la teoría de los sistemas dinámicos no es una teoría de fenómenos físicos, sino una teoría matemática, cuyos conceptos y técnicas se aplican a un amplio espectro de fenómenos. Lo mismo se puede decir de la teoría del caos y de la teoría de fractales, que son importantes ramas de la teoría de los sistemas dinámicos.

Las nuevas matemáticas, como veremos en detalle, son unas matemáticas de relaciones y patrones. Son cualitativas más que cuantitativas y, por lo tanto, encarnan el cambio de énfasis característico del pensamiento sistémico: de objetos a relaciones, de cantidad a cualidad, de substancia a patrón. El desarrollo de ordenadores de alta velocidad ha desempeñado un papel crucial en el nuevo dominio de la complejidad. Con su ayuda, los matemáticos pueden ahora resolver ecuaciones complejas antes imposibles y granar sus resultados en curvas y diagramas. De este modo, han podido descubrir nuevos patrones cualitativos de comportamiento de estos sistemas complejos: un nuevo nivel de orden subyacente en el aparente caos.

CIENCIA CLÁSICA

Para apreciar la novedad de las nuevas matemáticas de la complejidad, resulla instructivo contrastarlas con las matemáticas de la ciencia clásica. La ciencia, en el sentido moderno del término, empezó a finales del siglo xvi con Galileo Galilei, que fue el primero en realizar experimentos sistemáticos y en usar el lenguaje matemático para formular las leyes de la naturaleza que descubría. En aquellos tiempos, la ciencia era denominada aún «filosofía natural» y cuando Galileo decía «matemáticas», quería decir geometría. «La filosofía», escribió, «está escrita en el gran libro que permanece constantemente abierto ante nuestros ojos, pero no podemos comprenderlo si primero no aprendemos el lenguaje y los caracteres con los que está escrito. Este lenguaje es las matemáticas y los caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas.»'

Galileo había heredado esta visión de los filósofos de la antigua Grecia, quienes tendían a geometrizar todos los problemas matemáticos y a buscar sus respuestas en términos de figuras geométricas. Se dice que la Academia de Platón de Atenas, la principal escuela griega de ciencia y filosofía durante nueve siglos, tenía la siguiente inscripción sobre su entrada: «No entre el que no esté familiarizado con la geometría.»

Varios siglos después, un modo muy distinto de resolver problemas matemáticos, conocido como álgebra, fue desarrollado por filósofos islámicos en Persia, quienes, a su vez, lo habían aprendido de matemáticos indios. La palabra se deriva del árabe *al-yahr* («reunión de partes») y se reliere al proceso de reducir el

número de cantidades desconocidas uniéndolas en ecuaciones. El álgebra elemental contiene ecuaciones en las que letras -tomadas por convención del principio del alfabeto- representan varios números constantes. Un ejemplo bien conocido, que la mayoría de lectores recordará de sus años escolares , es la ecuación:

$$(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$$

El álgebra superior comprende relaciones llamadas «funciones» entre números variables o «variables» que están representadas por letras tomadas por convención del final del alfabeto, por ejemplo en la ecuación:

$$y = x + 1$$

la variable «y» es denominada «1unción de x», lo que en abreviatura matemática se escribiría: y = f(x).

Así pues, en tiempos de Galileo existían dos planteamientos distintos para la resolución de problemas matemáticos, que provenían de dos culturas diferentes. Estos dos planteamientos fueron unificados por Rene Descartes. Una generación más joven que Galileo, Descartes, considerado habitualmente como el fundador de la filosofía moderna, era también un brillante matemático. Su invención del método para representar las fórmulas y ecuaciones matemáticas en forma de figuras geométricas fue la mayor de entre sus grandes contribuciones a las matemáticas.

El método, conocido como geometría analítica, incluye coordenadas cartesianas, el sistema de coordenadas inventado por Descartes y que lleva su nombre. Por ejemplo, cuando la relación entre las dos variables «x» e «y» de nuestro ejemplo es representada en una gráfica de coordenadas cartesianas, vemos que corresponde a una línea recta (figura 6-1). Ésta es la razón por la que las ecuaciones de este tipo se denominan ecuaciones «lineales».

Del mismo modo, la ecuación «$y = x^2$» es representada por una parábola (figura 6-2). Las ecuaciones de este tipo, correspondientes a curvas en la cuadrícula cartesiana, se denominan ecuaciones «no-lineales». Tienen la característica destacada de que una o varias de sus variables están elevadas a potencias.

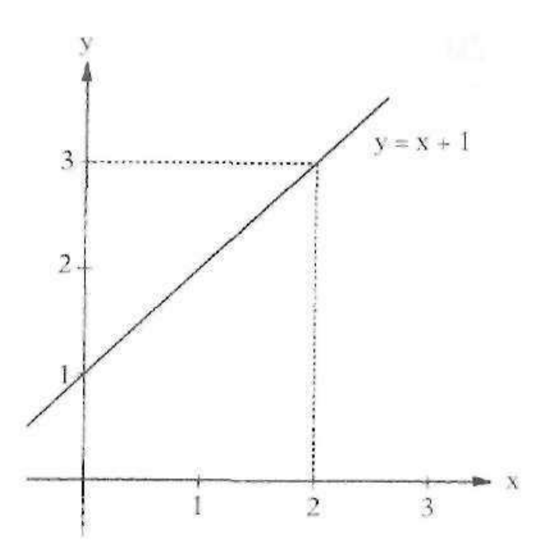


Figura 6-1
Gráfica correspondiente a la ecuación y = x + 1. Para cualquier punto sobre la línea recta, el valor de la coordenada «y» es siempre una unidad mayor que el de la coordenada «x».

ECUACIONES DIFERENCIALES

Con el nuevo método de Descartes, las leyes de la mecánica que Galileo había descubierto podían ser expresadas tanto en forma de ecuaciones algebraicas, como en forma geométrica de representaciones visuales. No obstante, había un problema matemático mayor que ni Galileo ni Descartes ni ninguno de sus contemporáneos podían resolver. Eran incapaces de formular una ecuación que describiese el movimiento de un cuerpo a velocidad variable, acelerando o decelerando.

Para entender el problema, consideremos dos cuerpos en movimiento, uno viajando con velocidad constante y el otro acelerando. Si dibujamos sus distancias y tiempos, obtenemos las dos gráficas de la figura 6-3. En el caso del cuerpo acelerado, la velocidad cambia a cada instante y esto es algo que Galileo y sus contemporáneos no podían expresar matemáticamente. En otras palabras, no podían calcular la velocidad exacta del cuerpo acelerado en un momento dado.

Esto lo conseguiría Isaac Newton, el gigante de la ciencia clásica, un siglo después, aproximadamente al mismo tiempo que el filósofo y matemático alemán Gottfried Wilhelm Leibniz. Para

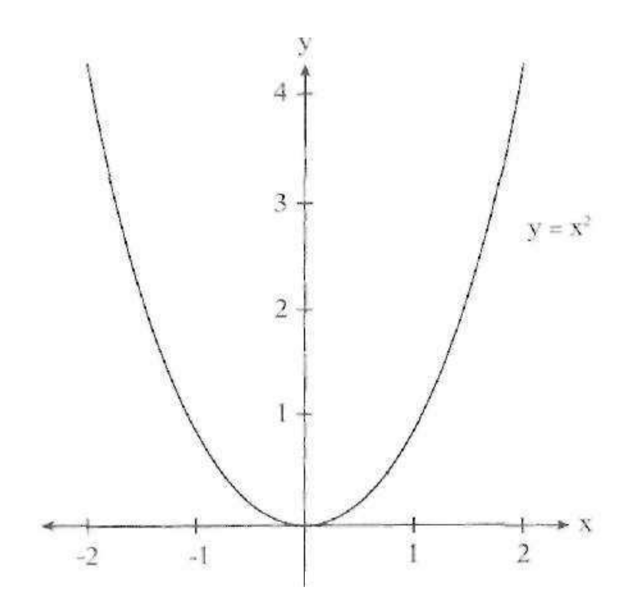


Figura 6-2
Gráfica correspondiente a la ecuación $y = x^2$. Para cualquier punto sobre la parábola, el valor de la coordenada «y» es igual al cuadrado de la coordenada «x».

resolver el problema que había atormentado a matemáticos y filósofos naturales durante siglos, Newton y Leibniz inventaron independientemente un nuevo método matemático, conocido como cálculo y considerado como el umbral de las «altas matemáticas».

Analizar cómo Newton y Leibniz se enfrentaron al problema resulta muy instructivo y no requiere el uso de lenguaje técnico. Sabemos todos cómo calcular la velocidad de un cuerpo en movimiento si ésta permanece constante. Si conducimos a 40 km/h, esto significa que en cada hora hemos recorrido una distancia de cuarenta kilómetros, de ochenta en dos horas y así sucesivamente. Por lo tanto, para obtener la velocidad del vehículo, simplemente dividimos la distancia (p. ej. 80 km) por el tiempo empleado para recorrerla (p. ej. 2 horas). En nuestra gráfica esto representa que debemos dividir la diferencia entre dos coordenadas de distancia, por la diferencia entre dos coordenadas de tiempo, como vemos en la figura 6-4.

Cuando la velocidad del vehículo aumenta, como sucede obviamente en cualquier situación real, habremos viajado a más o

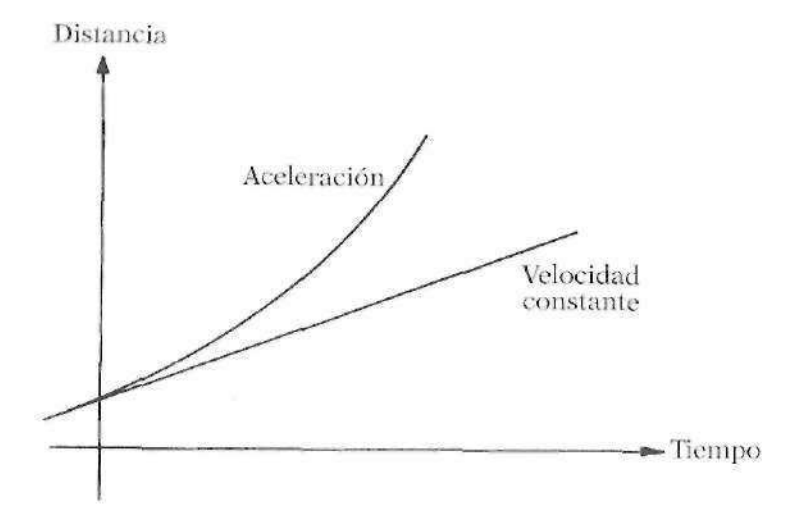


Figura 6-3
Gráfica correspondiente al movimiento de dos cuerpos, uno moviéndose a velocidad constante y el otro acelerando.

menos de 40 km/h, dependiendo de cuán a menudo hayamos acelerado o frenado. ¿Cómo podemos calcular la velocidad exacta en un momento determinado en un caso así?

He aquí cómo lo hizo Newton. Empezó por calcular primero la velocidad aproximada (en el ejemplo de aceleración) entre dos puntos de la gráfica, reemplazando la línea curva entre ellos por una línea recta. Como muestra la figura 6-5, la velocidad sigue siendo la relación entre (d_2-d_1) y (t_2-t_1). Ésta no será la velocidad exacta en ninguno de los dos puntos, pero si acortamos suficientemente la distancia entre ambos, será una buena aproximación.

Luego, redujo progresivamente el triángulo formado por la curva y las diferencias entre coordenadas, juntando los dos puntos de la curva cada vez más. De este modo, la línea recta entre los dos puntos se acerca cada vez más a la curva y el error en el cálculo de la velocidad entre los dos puntos se hace cada vez más pequeño. Finalmente, cuando alcanzamos *el limite de diferencias infinitamente pequeñas* -¡y éste es el paso crucial!- los dos puntos de la curva se funden en uno solo y conseguimos saber la velocidad exacta en dicho punto. Geométricamente, la línea recta será entonces una tangente a la línea curva.

Reducir matemáticamente el triángulo a cero y calcular la relación entre dos diferencias infinitamente pequeñas no es nada

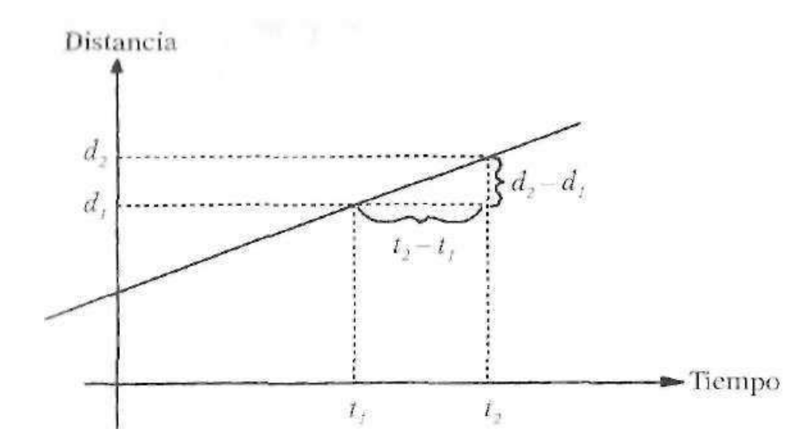


Figura 6-4
Para calcular una velocidad constante, dividir la diferencia entre las coordenadas de distancia $(d_2 - d_1)$ por la diferencia entre las coordenadas de tiempo $(t_2 - t_1)$.

trivial. La definición precisa del límite de lo infinitamente pequeño es la clave de todo el cálculo. Técnicamente, una diferencia infinitamente pequeña recibe el nombre de «diferencial», y en consecuencia, el cálculo inventado por Newton y Leibniz se conoce como cálculo diferencial. Las ecuaciones que comprenden diferenciales se denominan ecuaciones diferenciales.

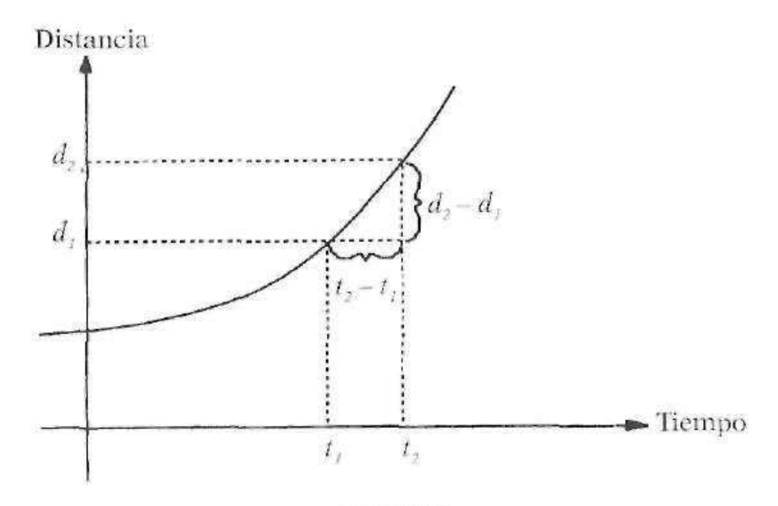


Figura 6-5
Cálculo de la velocidad aproximada entre dos puntos en el caso de aceleración.

Para la ciencia, la invención del cálculo diferencial represento un paso de gigante. Por primera vez en la historia de la humanidad, el concepto de infinito, que había intrigado a filósofos y poetas desde tiempo inmemorial, recibía una definición matemática precisa, lo que abría innumerables nuevas posibilidades al análisis de los fenómenos naturales.

El poder de esta nueva herramienta de análisis puede ilustrarse con la célebre paradoja de Zeno de la escuela eleática de la filosofía griega. Según Zeno, el gran atleta Aquiles nunca podrá alcanzar a una tortuga en una carrera en que ésta disponga de una ventaja inicial ya que, cuando Aquiles haya cubierto la distancia correspondiente a la ventaja de la tortuga, ésta habrá avanzado a su vez una cierta distancia y así hasta el infinito. Aunque el retraso del atleta va disminuyendo, nunca llegará a desaparecer, en todo momento la tortuga estará por delante. Por lo lanío, concluía Zeno, Aquiles, el corredor más rápido de la Antigüedad, nunca podrá alcanzar a la tortuga.

Los filósofos griegos y sus sucesores se enfrentaron a esta paradoja durante siglos, sin llegar a poderla resolver porque se les escapaba la definición exacta de lo infinitamente pequeño. El fallo en el razonamiento de Zeno estriba en el hecho de que, aunque Aquiles precisará de un número infinito de *pasos* para alcanzar a la tortuga, ello no requerirá un *tiempo* infinito. Con las herramientas de cálculo de Newton resulla fácil demostrar que un cuerpo en movimiento recorrerá un número infinito de trayectorias infinitamente pequeñas, en un tiempo finito.

En el siglo xvii, Isaac Newton utilizó su cálculo para describir lodos los posibles movimientos de cuerpos sólidos en Lérminos de una serie de ecuaciones diferenciales, que se conocen desde enlonces como las «ecuaciones newtonianas del movimiento». Este hecho fue ensalzado por Einstein como «quizás el mayor adelanto en el pensamiento que un solo individuo haya tenido jamás el privilegio de realizar».[2]

ENFRENTÁNDOSE A LA COMPLEJIDAD

Durante los siglos xviii y xix, las ecuaciones newtonianas del movimiento fueron refundidas en formas más generales, abstractas y elegantes por algunas de las principales mentes de la historia de las matemáticas. Si bien las reformulaciones sucesivas a cargo de Pierre Laplace, Leonhard Euler, Joseph Lagrange y Wi-

lliam Hamilton no modificaron el contexto de las ecuaciones de Newton, su creciente sofisticación permitió a los científicos analizar un abanico de fenómenos naturales cada vez mayor.

Aplicando su teoría al movimiento de los planetas, el mismo Newton pudo reproducir las principales características del sistema solar, a excepción de sus detalles más pequeños. Laplace, Sin embargo, redefinió y perfeccionó los cálculos de Newton hasta tal punto que consiguió explicar el movimiento de planetas, lunas y cometas hasta en sus más mínimos detalles, así como el flujo de las mareas y otros fenómenos relacionados con la gravedad.

Animados por este brillante éxito de la mecánica newtoniana en astronomía, los físicos y matemáticos lo hicieron extensivo al movimiento de fluidos y a la vibración de cuerdas, campanas y otros cuerpos elásticos, de nuevo con éxito. Estos impresionantes ꓘUTOS, hicieron pensar a los científicos de principios del siglo xix que el universo era efectivamente un inmenso sistema mecánico Funcionando según las leyes newtonianas del movimiento. De este modo, las ecuaciones diferenciales de Newton se convirtieron en los cimientos matemáticos del paradigma mecanicisla. Todo lo que acontecía tenía una causa y originaba un efecto definido, pudiendo ser predecido -en principio- el futuro de cualquier parte del sistema con absoluta certeza, a condición de conocer su estado con todo detalle en todo momento.

En la práctica, por supuesto, las limitaciones de la aplicación de las ecuaciones newtonianas del movimiento como modelo para la naturaleza pronto se hicieron evidentes. Como señala el matemático británico Ian Stewart, «*plantear* las ecuaciones es una cosa, *resolverlas* otra muy distinta».[3] Las soluciones exactas se limitaban a unos pocos, simples y regulares íenómenos, mientras que la complejidad de vastas áreas de la naturaleza parecía eludir lodo modelaje mecanicista. El movimiento relativo de dos cuerpos sometidos a la fuerza de la gravedad, por ejemplo, podía calcularse exactamente, el de tres cuerpos era ya demasiado complicado para la obtención de un resultado exacto, mientras que si se trataba de gases con millones de partículas, el problema parecía irresoluble.

Por otra parte, físicos y químicos habían observado durante mucho tiempo la regularidad del comportamiento de los gases, que había sido formulada en términos de las llamadas leyes de los gases, simples relaciones matemáticas entre temperatura, volumen y presión. ¿Cómo podía esta aparente simplicidad derivarse

de la enorme complejidad del movimiento de las partículas individuales?

En el siglo xix, el gran físico James Clerk Maxwell encontró la respuesta. Si bien el comportamiento exacto de las moléculas de un gas no podía ser determinado, su comportamiento *medio* podía ser la causa de las regularidades observadas. Maxwell propuso el uso de métodos estadísticos para la formulación de las leyes de los gases:

> La menor porción de materia que podemos someter a experimentación consta de millones de moléculas, ninguna de las cuales será jamás individualmente perceptible para nosotros. Así pues, no podemos determinar el movimiento real de ninguna de dichas moléculas, por tanto, debemos abandonar el método histórico estricto y adoptar el método estadístico para tratar con grandes grupos de moléculas.[4]

El método de Maxwell resultó efectivamente muy útil. Permitió inmediatamente a los físicos explicar las propiedades básicas de un gas en términos del comportamiento medio de sus moléculas. Por ejemplo, quedó claro que la presión de un gas es la fuerza originada por la media del empuje de sus moléculas,[5] mientras que la temperatura resultó ser proporcional a su energía media de movimiento. La estadística y su base teórica, la ley de probabilidades, habían sido desarrolladas desde el siglo XVII y podían ser fácilmente aplicadas a la teoría de los gases. La combinación de métodos estadísticos con la mecánica newtoniana dio lugar a una nueva rama de la ciencia, adecuadamente denominada «mecánica estadística», que se convirtió en la base teórica de la termodinámica, la teoría del calor.

NO-LINEALIDAD

Así pues, los científicos del siglo xix habían desarrollado dos herramientas matemáticas distintas para representar a los fenómenos naturales: ecuaciones exactas y deterministas para el movimiento de sistemas sencillos y las ecuaciones de la termodinámica, basadas en el análisis estadístico de cantidades medias, para los sistemas mas complejos.

Aunque las dos técnicas eran bien distintas, tenían algo en común: ambas incluían ecuaciones *lineales.* Las ecuaciones newtonianas del movimiento son muy generales, apropiadas tanto para fenómenos lineales como no-lineales. De hecho, de vez en cuando se planteaban ecuaciones no-lineales, pero dado que éstas eran normalmente demasiado complejas para ser resueltas y debido a la aparente naturaleza caótica de los fenómenos naturales asociados -como los flujos turbulentos de agua y aire-, los científicos evitaban generalmente el estudio de sistemas no-lineales.[6]

Así pues, cuando aparecían ecuaciones no-lineales eran inmediatamente «linealizadas», es decir, reemplazadas por aproxima------ lineales. De este modo, en lugar de describir los fenómenos en toda su complejidad, las ecuaciones de la ciencia clásica Halaban *de pequeñas* oscilaciones, *suaves* ondas, *pequeños* cambios de temperatura, etc. Como observa Ian Stewart, este hábito arraigó tanto que muchas ecuaciones eran linealizadas *mientras se planteaban*, de modo que los textos científicos ni siquiera incluían su versión no-lineal íntegra. Consecuentemente, la mayoría de científicos e ingenieros llegaron a creer que virtualmente lodos los fenómenos naturales podían ser descritos por ecuaciones lineales. «Al igual que el mundo era una máquina de relojería en el siglo XVIII, era un mundo lineal en el siglo xix y la mayor parte del siglo XX.»[7]

El cambio decisivo a lo largo de las tres últimas décadas ha sido el reconocimiento de que la naturaleza, como dice Steward, es «inexorablemente no-lineal». Los fenómenos no-lineales dominan mucho más el mundo inanimado de lo que creíamos y constituyen un aspecto esencial de los patrones en red de los sistemas vivos. La teoría de sistemas dinámicos es la primera matemática que capacita a los científicos para tratar la plena complejidad de estos fenómenos no-lineales.

La exploración de los sistemas no-lineales a lo largo de las últimas décadas ha tenido un profundo impacto sobre la ciencia en su totalidad, al obligarnos a reconsiderar algunas nociones muy básicas sobre las relaciones entre un modelo matemático y el fenómeno que describe. Una de estas nociones concierne a lo que entendemos por simplicidad y complejidad.

En el mundo de las ecuaciones lineales, creíamos que los sistemas descritos por ecuaciones simples se comportaban simplemente, mientras que aquellos descritos por complicadas ecuaciones lo hacían de modo complicado. En el mundo no-lineal -que, como empezamos a descubrir, incluye la mayor parte del mundo real-, simples ecuaciones deterministas pueden producir una insospechada riqueza y variedad de comportamiento. Por otro la-

do, un comportamiento aparentemente complejo y caótico puede dar lugar a estructuras ordenadas, a sutiles y hermosos patrones. De hecho, en la teoría del caos, el término «caos» ha adquirido un nuevo significado técnico. El comportamiento de los sistemas caóticos no es meramente aleatorio, sino que muestra un nivel más profundo de orden pautado. Como veremos más adelante, las nuevas técnicas matemáticas hacen visibles de distintos modos estos patrones subyacentes.

Otra propiedad importante de las ecuaciones no-lineales qui--a estado incomodando a los científicos, es que la predicción exacta es a menudo imposible, aunque las ecuaciones en sí puedan ser estrictamente deterministas. Veremos que este sorprendente aspecto de la no-linealidad ha comportado un importante cambio de éníasis del análisis cuantitativo al cualitativo.

RETROALIMENTACIÓN E INTERACIONES

La tercera propiedad importante de los sistemas no-lineales es la consecuencia de la frecuente ocurrencia de procesos de retroalimentación autorreforzadora.

En los sistemas lineales, pequeños cambios producen pequeños efectos, mientras que los grandes cambios son resultado de grandes cambios o bien de la suma de muchos pequeños cambios. Por el contrario, en los sistemas no-lineales los pequeños cambios pueden tener efectos espectaculares, ya que pueden ser repetidamente amplificados por la retroalimentación autorreforzadora.

Matemáticamente, un bucle de retroalimentación corresponde a una determinada clase de proceso no-lineal conocido como iteración (del latín *iterare,* «repetir», «reiterar»), en el que una función opera reiteradamente sobre sí misma. Por ejemplo, si la función consiste en multiplicar la variable x por 3 -p. ej. f(x) = 3x-, la iteración consiste en multiplicaciones repetidas. En abreviatura matemática esto se escribiría como sigue:

x 3x
3x 9x
9x 27x
etc.

Cada uno de estos pasos recibe el nombre de una «cartografía». Si visualizamos la variable x como una línea de números, la

operación x -> 3x cartografía cada número con otro de la línea. Generalmente, una cartografía que consiste en multiplicar x por un número constante k se escribe como sigue:

x -> kx

Una iteración frecuentemente encontrada en sistemas no-lineales y que, aun siendo muy simple, produce gran complejidad, es la siguiente:

x -> kx (1 - x)

en la que la variable x queda restringida a valores entre 0 y 1. Esta cartografía, conocida en matemáticas como «cartografía logística», tiene muchas aplicaciones importantes. La usan los ecólogos para describir el crecimiento de una población bajo tendencias opuestas, y por esta razón se conoce también como la «ecuación del crecimiento».[8]

Explorar las iteraciones de varias cartografías logísticas resulta un ejercicio fascinante, que puede hacerse fácilmente con una pequeña calculadora de bolsillo.[9] Para ver la característica principal de estas iteraciones tomemos de nuevo el valor k = 3:

x -> 3x (1 - x)

La variable *x* se puede visualizar como un segmento de línea, creciendo de 0 a 1, y resulta fácil calcular las cartografías de unos cuantos puntos como sigue:

0 -> 0 (1 - 0) = 0
0,2 -> 0,6 (1 - 0,2) = 0,48
0,4 -> 1,2 (1 - 0,4) = 0,72
0.6 -> 1,8 (1 - 0,6) = 0,72
0,8 -> 2,4 (1 - 0,8) = 0,48
1 -> 3 (1 - 1) = 0

Cuando marcamos estos números sobre dos segmentos, vemos que los números entre 0 y 0,5 se cartografían como números entre 0 y 0,75. Así 0,2 se convierte en 0,48 y 0,4 en 0,72. Los números entre 0,5 y 1 se cartografían sobre el mismo segmento pero en orden inverso. Así 0,6 se convierte en 0,72 y 0,8 en 0,48. El efecto de conjunto puede observarse en la figura 6-6, en la que

podemos ver que el cartografiado estira el segmento hasta cubrir la distancia entre 0 y 1,5 y luego se repliega sobre sí mismo, formando un segmento que va de 0 a 0,75 y de vuelta a 0.

Una iteración de esta cartografía originará operaciones repetidas de estirado y replegado, muy parecidas a las que efectúa un panadero con su masa, razón por la cual dicha iteración recibe el nombre, muy apropiado por cierto, de «transformación del panadero». A medida que avanza el estiramiento y el repliegue, lo-, puntos vecinos del segmento irán siendo desplazados más y más uno del otro, hasta que resulta imposible predecir en qué posición se encontrará un punto determinado tras múltiples iteraciones.

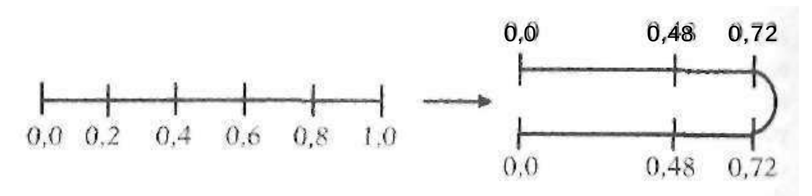


Figura 6-6
La cartografía logística o «transformación del panadero».

Figura 6-6
La cartografía logística o «transformación del panadero».

Incluso los ordenadores más potentes redondean sus cálculos al llegar a un cierto número de decimales, y después de un número suficiente de iteraciones, incluso el más pequeño error de redondeo habrá añadido suficiente incerticlumbre para convertir toda predicción en imposible. La transformación del panadero es un prototipo de los procesos no-lineales, altamente complejos e impredecibles, conocidos técnicamente como caos.

POINCARÉ Y LAS HUELLAS DEL CAOS

La teoría de los sistemas dinámicos, las matemáticas que han hecho posible traer orden al caos, fue desarrollada muy recientemente, pero sus cimientos fueron puestos a principios de siglo por uno de los matemáticos más grandes de la era moderna, Jules Henri Poincaré. De entre todos los matemáticos de este siglo, Poincaré fue, con mucho, el más grande generalista. Hizo innumerables contribuciones a virtualmente todas las ramas de las matemáticas y la recopilación de sus trabajos abarca varios centenares de volúmenes.

Desde nuestra perspectiva aventajada de finales de siglo, po-

demos ver que la mayor contribución de Poincaré fue la recuperación para las matemáticas de las metáforas visuales.[10] A partir del siglo xvii, el estilo de las matemáticas europeas había cambiado gradualmente de la geometría, las matemáticas de las formas visuales, al álgebra, las matemáticas de las fórmulas. Laplace fue especialmente uno de los grandes formalizadores que presumía de que su *Mecánica analítica* no contenía figura alguna. Poincaré invirtió esta tendencia, rompiendo el dominio de análisis y fórmulas crecientemente opaco y volviendo a los pa---nes visuales.

No obstante, las matemáticas visuales de Poincaré, no son la geometría de Euclides. Es una geometría de una nueva especie, unas matemáticas de patrones y relaciones conocidas como topología. La topología es una geometría en la que todas las longitudes, ángulos y áreas pueden ser distorsionados a voluntad. Así, un triángulo puede ser transformado en continuidad en un rectángulo, éste en un cuadrado y éste en un círculo. De igual modo, un cubo puede convertirse en un cilindro, éste en un cono y éste en una esfera. Debido a estas transformaciones continuas, la topología es conocida popularmente como la «geometría elástica». Todas las figuras que se pueden convertir en otras mediante doblado, estirado y retorcido continuos, reciben la calificación de «topológicamente equivalentes».

Sin embargo, no todo es modificable en estas transformaciones topológicas. De hecho, la topología trata precisamente de eslas propiedades de las figuras geométricas que no cambian cuando la figura es transformada. Las intersecciones de líneas, por ejemplo, siguen siendo intersecciones y el agujero de un donut no puede ser transformado. Así, un donut puede ser transformado topológicamente en una taza de café (el agujero convirtiéndose en el mango), pero nunca en un pastelito. La topología es realmente las matemáticas de las relaciones, de los patrones inmutables o «invariantes».

Poincaré usaba los conceptos topológicos para analizar las características cualitativas de problemas dinámicos complejos y así sentaba las bases para las matemáticas de la complejidad que emergerían un siglo después. Entre los problemas que Poincaré analizó de este modo estaba el célebre problema de los tres cuerpos en mecánica celeste -el movimiento relativo de tres cuerpos sometidos a sus respectivas atracciones gravitatorias-, que nadie había sido capaz de resolver.[11] Aplicando su método topológico a una versión ligeramente simplificada del problema de los tres

cuerpos, Poincaré fue capaz de determinar el aspecto general de sus trayectorias y quedó asombrado por su complejidad:

> Cuando uno trata de describir la figura formada por estas tres curvas y sus infinitas intersecciones... [uno descubre que] estas intersecciones forman una especie de red, trama o malla infinitamente espesa; ninguna de las curvas puede cruzarse a sí misma, pero se repliega de un modo muy complejo para pasar por los nudos de la red un número infinito de veces. Uno queda sorprendido ante la complejidad de esta figura que no puedo ni siquiera intentar dibujar.[12]

Lo que Poincaré visualizaba en su mente se conoce ahora como un «atractor extraño». En palabras de Ian Stewart, «Poincaré vislumbraba las huellas del caos».[13]

Al demostrar que simples ecuaciones deterministas de movimiento pueden producir una increíble complejidad que supera todo intento de predicción, Poincaré desafiaba las mismas bases de la mecánica newtoniana. No obstante, y por un capricho de la historia, los científicos de principio de siglo no aceptaron este reto. Unos años después de que Poincaré publicara su trabajo sobre el problema de los tres cuerpos, Max Planck descubría la energía cuántica y Albert Einstein publicaba su teoría especial de la relatividad.[14] Durante la siguiente mitad de siglo, físicos y matemáticos estuvieron tan fascinados por los desarrollos revolucionarios en la física cuántica y la teoría de la relatividad, que el descubrimiento pionero de Poincaré quedó relegado. No sería hasta los años sesenta que los científicos tropezarían de nuevo con las complejidades del caos.

TRAYECTORIAS EN ESPACIOS ABSTRACTOS

Las técnicas matemáticas que han permitido a los investigadores el descubrimiento de patrones ordenados en sistemas caóticos a lo largo de las tres últimas décadas, se basan en el enfoque topológico de Poincaré y están íntimamente ligadas al desarrollo de los ordenadores. Con la ayuda de las computadoras de alta velocidad de hoy en día, los científicos pueden resolver ecuaciones no-lineales mediante técnicas no disponibles anteriormente. Estos poderosos equipos pueden trazar con facilidad las complejas trayectorias que Poincaré ni siquiera se atrevía a intentar dibujar.

Como la mayoría de lectores recordará de su etapa escolar, una ecuación se resuelve mediante su manipulación hasta conseguir la solución en forma de una fórmula. A esto se le llama resolver la ecuación «analíticamente». El resultado es siempre una fórmula. La mayoría de ecuaciones no-lineales que describen procesos naturales son demasiado difíciles para ser resueltas analíticamente, pero pueden ser solucionadas de otro modo, «numéricamente». Este sistema implica prueba y error. Hay que ir probando distintas combinaciones de números para las variables, hasta dar con las que encajan en la ecuación. Se han desarrollado técnicas y trucos especiales para hacerlo eficientemente, pero aun así, para la mayoría de ecuaciones el proceso es extremadamente laborioso, ocupa mucho tiempo y proporciona únicamente soluciones aproximadas.

Todo esto cambié) con la llegada a escena de los nuevos y poderosos ordenadores. Disponemos ahora de equipos y programas informáticos para la solución numérica de ecuaciones con gran rapidez y exactitud. Con los nuevos métodos, las ecuaciones no-lineales pueden ser resueltas a cualquier nivel de aproximación. No obstante, las soluciones son de una clase muy distinta, el resultado no es ya una fórmula, sino una larga lista de los valores para las variables que satisfacen la ecuación. El ordenador puede ser programado para trazar la solución en forma de curva o conjunto de curvas en un gráfico. Esta técnica ha permitido a los científicos resolver las complejas ecuaciones no-lineales asociadas con los fenómenos caóticos y así descubrir orden tras el aparente caos.

Para desvelar estos patrones ordenados, las variables de un sistema complejo se presentan en un espacio matemático abstracto llamado «espacio fase»." Ésta es una técnica bien conocida desarrollada en termodinámica a principios de siglo.[15] Cada variable del sistema se asocia con una distinta coordenada de este espacio abstracto. Veamos de qué se trata con un ejemplo muy simple: una esfera balanceándose al extremo de un péndulo. Para describir completamente el movimiento del péndulo, necesitamos dos variables: el ángulo, que puede ser positivo o negativo, y la velocidad, que a su vez puede ser positiva o negativa, según sea la dirección del balanceo. Con estas dos variables, ángulo y velocidad, podremos describir completamente el movimiento del péndulo en cualquier momento.

* En el original, *phase space. (N. del T.l*

Si trazamos ahora un sistema de coordenadas cartesianas, en el que una coordenada sea el ángulo y la otra la velocidad (ver figura 6-7), este sistema de coordenadas ocupará un espacio bidimensional en el que ciertos puntos corresponderán a los estados posibles de movimiento del péndulo. Veamos dónde están estos puntos. En ambos extremos del recorrido, la velocidad es cero. Esto nos da dos puntos sobre el eje horizontal. En el centro del recorrido, donde el ángulo es cero, la velocidad es máxima, bien positiva (balanceo hacia un lado), bien negativa (balanceo hacia el otro lado). Esto nos da dos puntos sobre el eje vertical. Estos cuatro puntos en el espacio lase, que hemos marcado en la figura 6-7, representan los estados extremos del péndulo: máxima elongación y máxima velocidad. La localización exacta de estos puntos dependerá de nuestras unidades de medida.

Si siguiésemos marcando los puntos correspondientes a los estados de movimiento entre los cuatro extremos, descubriríamos que están sobre un bucle cerrado. Podríamos conseguir que fuese circular si escogiésemos adecuadamente nuestras unidades de medida, pero, generalmente, resultará mas bien una elipse (figura 6-8). Este bucle recibe el nombre de trayectoria pendular en espacio fase. Describe íntegramente el movimiento del sistema. Todas sus variables (dos en nuestro sencillo caso) quedan representadas por un solo punto, que se encontrará siempre en alguna parte sobre el bucle. A medida que el péndulo oscila, el punto en espacio fase se desplaza sobre el bucle. En todo momento, podemos medir las dos coordenadas del punto en espacio fase y cono-

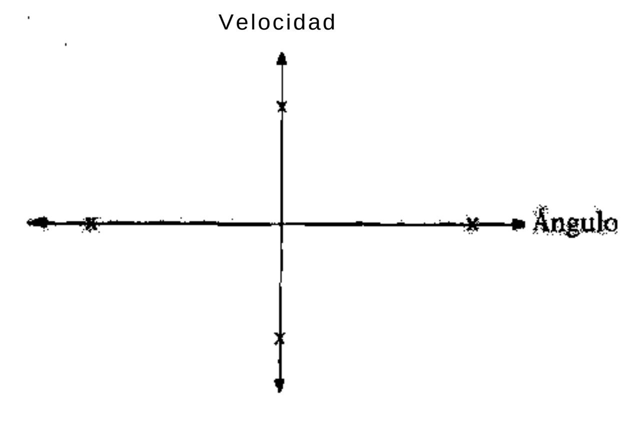


Figura 6-7
El espacio fase bidimensional de un péndulo.

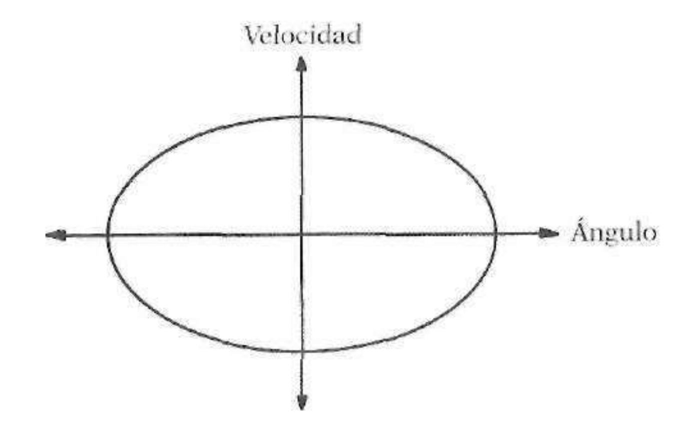


Figura 6-8
Trayectoria del péndulo en espacio fase.

cer el estado exacto -ángulo y velocidad- del sistema. Es importante comprender que este bucle no es en absoluto la trayectoria física de la esfera en el extremo del péndulo, sino una curva en un espacio matemático abstracto, compuesto por las dos variables del sistema.

De modo que ésta es la técnica del espacio fase. Las variables del sistema se representan en un espacio abstracto, en el cual un solo punto describe el sistema completo. A medida que el sistema cambia, el punto describe una trayectoria en espacio fase, un bucle cerrado en nuestro caso. Cuando el sistema no es un simple péndulo sino algo mucho más complicado, tiene muchas más variables, pero la técnica seguirá siendo la misma. Cada variable estará representada por una coordenada en una dimensión distinta en el espacio lase, de modo que si tenemos dieciséis variables, tendremos un espacio fase en dieciséis dimensiones. Un simple punto en este espacio describirá el estado del sistema entero, ya que este punto recogerá dieciséis coordenadas, correspondientes a cada una de las dieciséis variables.

Por supuesto, no podemos visualizar un espacio fase con dieciséis dimensiones y ésta es la razón de que se denomine un espacio matemático abstracto. Los matemáticos no parecen tener mayores problemas con semejantes abstracciones. Se sienten muy confortables en espacios que no pueden ser visualizados. En cualquier momento, mientras el sistema cambia, el punto representativo de su estado en espacio fase se desplazará por dicho espacio, describiendo una trayectoria. Distintos estados iniciales

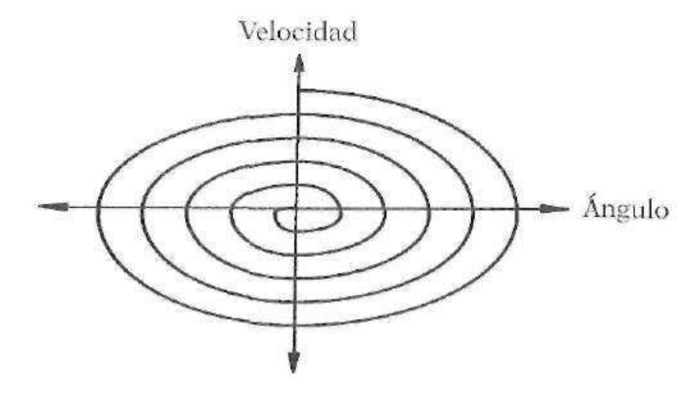


Figura 6-9
Trayectoria en espacio fase de un péndulo con fricción.

del sistema se corresponden con distintos puntos de partida en espacio fase y darán, en general, origen a trayectorias distintas.

ATRACTORES EXTRAÑOS

Volvamos a nuestro péndulo y démonos cuenta de que se trataba de un péndulo idealizado, sin fricción, balanceándose en movimiento perpetuo. Éste es un ejemplo típico de la física clásica, donde la fricción es generalmente olvidada. Un péndulo real experimentará siempre alguna fricción que lo irá frenando hasta que, en algún momento, se detendrá. En el espacio fase bidimensional, este movimiento queda representado por una curva abierta que se cierra en espiral hacia el centro, como puede apreciarse en la figura 6-9. Esta trayectoria recibe el nombre de «atractor» puesto que, metafóricamente hablando, los matemáticos dicen que el punto fijo en el centro del sistema «atrae» la trayectoria. La metáfora se ha extendido incluso a los bucles cerrados, como el que representa al péndulo libre de fricción. Las trayectorias de bucle cerrado reciben el nombre de «atractores periódicos», mientras que las trayectorias en espiral hacia adentro se denominan «atractores puntuales».

En los últimos veinte años, la técnica del espacio fase ha sido utilizada para explorar una gran variedad de sistemas complejos. Caso tras caso, los científicos y matemáticos crearon ecuaciones no-lineales, las resolvieron numéricamente e hicieron que los ordenadores trazaran las soluciones en espacio fase. Para su gran

sorpresa, descubrieron que existe un número muy reducido de diferentes atractores. Sus formas pueden ser clasificadas topológicamente y las propiedades dinámicas generales de un sistema pueden deducirse de la forma de su correspondiente atractor.

Existen tres modelos básicos de atractor: atractores puntuales, correspondientes a sistemas dirigidos hacia un equilibrio estable; atractores periódicos, correspondientes a oscilaciones periódicas, y los llamados atractores extraños, correspondientes a sistemas caóticos. Un ejemplo típico de un sistema con atractor extraño es el del «péndulo caótico», estudiado por primera vez por el matemático japonés Yoshisuke Ueda a finales de los años setenta. Se trata de un circuito electrónico no-lineal dotado de una unidad de disco externa, relativamente sencilla, pero que produce un comportamiento extremadamente complejo.[16] Cada balanceo de este oscilador caótico es único. El sistema nunca se repite, con lo que cada ciclo cubre una nueva región de espacio fase. No obstante, y a pesar del aparentemente errático movimiento, los puntos en espacio fase no se distribuyen aleatoriamente, sino que conforman un patrón complejo y altamente organizado, un atractor extraño actualmente denominado Ueda.

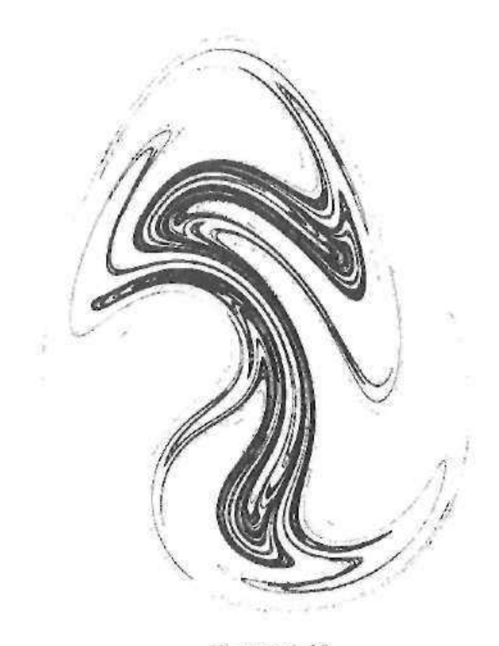


Figura 6-10
El atractor Ueda; de Ueda y otros (1993).

El atractor de Ueda es una trayectoria en un espacio fase tridimensional que genera patrones que casi se repiten, pero no del todo. Ésta es una característica típica de todos los sistemas caóticos. La figura 6-10 contiene más de cien mil puntos. Podría visualizarse como un corte longitudinal de un trozo de masa de pan que ha sido repetidamente estirado y replegado sobre sí mismo, con lo que podemos observar que las matemáticas subyacentes en el atractor de Ueda son las de la «transformación del panadero».

Un hecho sorprendente de los atractores extraños es que tienden a tener una dimensionalidad muy baja, incluso en un espacio fase altamente dimensional. Por ejemplo, un sistema puede tener cincuenta variables, pero su movimiento puede quedar restringido a un atractor extraño de tres dimensiones: una superficie plegada en este espacio de cincuenta dimensiones. Ello significa, por supuesto, un elevado nivel de orden.

Vemos pues que el comportamiento caótico, en el nuevo sentido científico del término, es muy distinto del movimiento aleatorio o errático. Con la ayuda de los atractores extraños, podemos distinguir entre la mera aleatoriedad o «ruido» y el caos. El comportamiento caótico es determinista y pautado y los atractores extraños nos ayudan a transformar los datos aparentemente aleatorios en claras formas visibles.

EL «EFECTO MARIPOSA»

Como hemos visto en el caso de la «transformación del panadero», los sistemas caóticos se caracterizan por una extrema sensibilidad a las condiciones iniciales. Cambios minúsculos en el estado inicial del sistema conducirán con el tiempo a consecuencias en gran escala. En la teoría del caos esto se conoce con el nombre de «efecto mariposa» por la afirmación, medio en broma, de que una mariposa aleteando hoy en Pekín puede originar una tormenta en Nueva York el mes que viene. El efecto mariposa fue descubierto a principios de los años sesenta por el meteorólogo Edward Lorenz, quien diseñó un sencillo modelo de condiciones meteorológicas consistente en tres ecuaciones no-lineales vinculadas. Descubrió que las soluciones de sus ecuaciones eran extremadamente sensibles a las condiciones iniciales. Desde prácticamente el mismo punto de origen, dos trayectorias se desarrollaban de modo completamente distinto, haciendo imposible toda predicción a largo plazo.[17]

Este descubrimiento sacudió a la comunidad científica, acostumbrada a confiar en ecuaciones deterministas para predecir fenómenos tales como los eclipses solares o la aparición de cometas con gran precisión sobre largos períodos de tiempo. Parecía inconcebible que ecuaciones estrictamente deterministas de movimiento pudiesen conducir a resultados impredecibles, pero esto era exactamente lo que Lorenz había descubierto. Según sus propias palabras:

> Cualquier persona corriente, viendo que podemos predecir bastante bien las mareas con algunos meses de antelación, se diría: «¿Por qué no podemos hacer lo mismo con la atmósfera? Después de todo, no es más que otro sistema fluido, con leyes más o menos igual de complicadas.» Pero me di cuenta de que *cualquier* sistema físico con comportamiento no periódico resulta impredecible.[18]

El modelo de Lorenz no es una representación realista de un fenómeno meteorológico en particular, pero resulta un impresionante ejemplo de cómo un simple conjunto de ecuaciones no-lineales puede generar un comportamiento enormemente complejo. Su publicación en 1963 marcó el inicio de la teoría del caos, y el atractor del modelo, conocido desde entonces como el atractor Lorenz, se convirtió en el atractor extraño más popular y ampliamente estudiado. Mientras que el atractor de Ueda se desarrolla en dos dimensiones, el de Lorenz es tridimensional (figura 6-11).

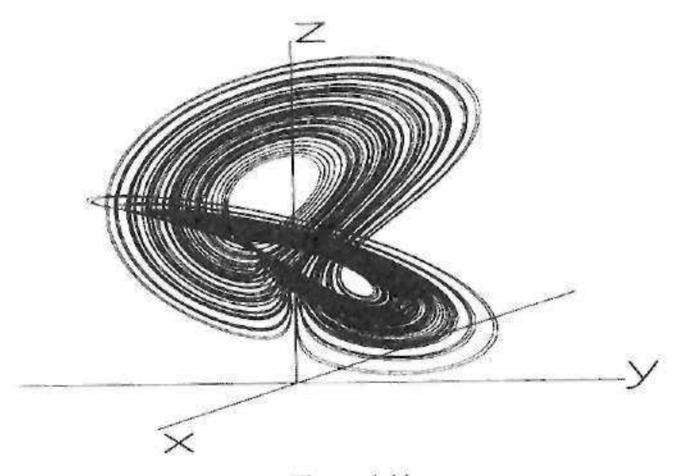


Figura 6-11
El atractor de Lorenz: de Mosekilde y otros (1994).

Para trazarlo, el punto en espacio fase se mueve de un modo aparentemente aleatorio, con unas cuantas oscilaciones de amplitud creciente alrededor de un punto, seguidas por otras oscilaciones alrededor de un segundo punto, para volver luego súbitamente a oscilar sobre el primer punto y así sucesivamente.

DE CANTIDAD A CUALIDAD

La imposibilidad de predecir por qué punto del espacio lase pasará la trayectoria del atractor de Lorenz. en un momento determinado, incluso aunque el sistema esté gobernado por ecuaciones deterministas, es una característica común a lodos los sislemas caóticos. Ello no significa, sin embargo, que la teoría del caos no sea capa/ de ofrecer predicciones. Podemos establecer predicciones muy ajustadas, pero estarán en relación con las características cualitativas del comportamiento del sistema, más que con sus valores precisos en un momento determinado. Las nuevas matemáticas representan, pues, el cambio de cantidad a cualidad que caracteriza al pensamiento sistémico en general. Mientras que las matemáticas convencionales se ocupan de cantidades y fórmulas, la teoría de sistemas dinámicos lo hace de cualidad y patrón.

En realidad, el análisis de sistemas no-lineales en términos de las características topológicas de sus atraclores, se conoce como «análisis cualitativo». Un sistema no-lineal puede tener varios atractores que podrán ser de distinto tipo: «caóticos» o «extraños» y no caóticos. Todas las trayectorias iniciadas dentro de una cierta región de espacio fase, desembocarán antes o después en un mismo alractor. Dicha región de espacio fase recibe el nombre de «cuenca de atracción» de este mismo atractor. Así, el espacio fase de un sistema no-lineal está compartimentado en varias cuencas de atracción, cada una de ellas con su propio atractor.

Así pues, el análisis cualitativo de un sistema dinámico consiste en identificar los atractores y cuencas de atracción del sistema y clasificarlos según sus características topológicas. El resultado es un dibujo dinámico del sistema completo llamado el «retrato fase». Los métodos matemáticos para analizar retratos fase se basan en el trabajo pionero de Poincaré y fueron desarrollados y redefinidos por el topólogo norteamericano Stephen Smale a principios de los años sesenta.[19]

Smale utilizó su técnica no sólo para analizar sistemas descritos por un determinado conjunto de ecuaciones no-lineales, sino también para estudiar cómo estos sistemas se comportan bajo pequeñas alteraciones de sus ecuaciones. A medida que los parámetros de éstas cambian lentamente, el retrato fase -por ejemplo, las formas de sus atractores y cuencas de atracción- generalmente sufrirá las correspondientes suaves alteraciones, sin experimentar ningún cambio en sus características básicas. Smale utilizó el término «eslructuralmente estables» para definir estos sistemas en los que pequeños cambios en las ecuaciones dejan intacto el carácter básico del retrato fase.

En muchos sistemas no-lineales, sin embargo, pequeños cambios de ciertos parámetros pueden producir espectaculares cambios en las características básicas de su retrato fase. Los atractores pueden desaparecer o intercambiarse y nuevos atractores pueden aparecer súbitamente. Tales sistemas se definen como estructuralmente inestables y los puntos críticos de inestabilidad se denominan «puntos de bifurcación», ya que son puntos en la evolución del sistema en que aparece repentinamente un desvío por el que el sistema se encamina en una nueva dirección. Matemáticamente, los puntos de bifurcación marcan cambios súbitos en el retrato fase del sistema.

Físicamente corresponden a puntos de inestabilidad en los que el sistema cambia abruptamente y aparecen de repente nuevas formas de orden. Como demostró Prigogine, tales inestabilidades sólo se pueden dar en sistemas abiertos operando lejos del equilibrio.[20]

Así como hay un número reducido de diferentes tipos de atractores, hay también pocos tipos distintos de ocasiones de bifurcación, y al igual que los atractores, las bifurcaciones pueden ser clasificadas topológicamente. Uno de los primeros en hacerlo fue el francés René Thom en los años setenta, quien usó el término «catástrofes» en lugar de «bifurcaciones» e identificó siete catástrofes elementales.[21] Los matemáticos de hoy en día conocen aproximadamente el triple de tipos de bifurcación. Ralph Abraham, profesor de matemáticas de la Universidad de California en Santa Cruz, y el grafista Christofer Shaw han creado una serie de textos matemáticos visuales sin ecuaciones ni fórmulas, a los que consideran el principio de una enciclopedia de bifurcaciones.[22]

Mientras los primeros atractores extraños eran explorados, durante los años sesenta y setenta nacía, independientemente de la teoría del caos, una nueva geometría llamada «geometría fractal», que iba a proveer de un poderoso lenguaje matemático idóneo para describir las minuciosas estructuras de los atractores caóticos. El creador de este nuevo lenguaje fue el matemático francés Benoit Mandelbrot. A finales de los años cincuenta, Mandelbrot empezó a estudiar la geometría de una gran variedad de fenómenos naturales irregulares y, durante los sesenta, se dio cuenta de que todas aquellas formas geométricas compartían algunas características comunes muy sorprendentes.

Durante los siguientes diez años, Mandelbrot inventó un nuevo tipo de matemáticas para describir y analizar estas características. Acuñó el término «fractal» para describir su invento y publicó sus resultados en un espectacular libro, *Los objetos fractales,* que tuvo una tremenda influencia en la nueva generación de matemáticos que estaba desarrollando la teoría del caos y otras ramas de la teoría de sistemas dinámicos.[23]

En una reciente entrevista, Mandelbrot explicaba que la geometría fractal se ocupa de un aspecto de la naturaleza del que casi todo el mundo era consciente, pero que nadie era capaz de describir en términos matemáticos formales.[24] Algunas características de la naturaleza son geométricas en el sentido convencional del término. El tronco de un árbol es más o menos un cilindro, la luna llena aparece más o menos como un disco circular y los planetas circulan alrededor del sol en órbitas más o menos elípticas. Pero esto son excepciones, como Mandelbrot nos recuerda:

> La mayor parte de la naturaleza es muy, muy complicada. ¿Como describir una nube? No es una esfera... es como una pelota pero muy irregular. ¿Y una montaña? No es un cono... Si quieres hablar de nubes, montañas, ríos o relámpagos, el lenguaje geométrico de la escuela resulta inadecuado.

Así que Mandelbrot creó la geometría fractal -«un lenguaje para hablar de nubes»- para describir y analizar la complejidad del mundo natural que nos rodea.

La propiedad más sorprendente de estas formas «fractales» es_ que sus patrones característicos se encuentran repetidamente en escalas descendentes, de modo que sus partes, en cualquier escala, son semejantes en forma al conjunto. Mandelbrot ilustra esta característica de «autosemejanza» cortando un trozo de coliflor y señalando que, en sí mismo, el trozo parece una pequeña coliflor.[25] Repite la operación dividiendo el trozo y tomando una parte que sigue pareciendo una diminuta coliflor. Así, cada parte se parece al vegetal completo, la forma del todo es semejante a sí misma a todos los niveles de escala.

Hay múltiples ejemplos de autosemejanza en la naturaleza. Rocas en montañas que se asemejan a pequeñas montañas, ramas de relámpago o bordes de nube que repiten el mismo patrón una y otra vez, líneas costeras que se dividen en partes cada vez menores, cada una de las cuales muestra semejantes disposiciones de playas y cabos. Las fotografías del delta de un río, el ramaje de un árbol o las ramificaciones de los vasos sanguíneos pueden evidenciar pautas de tan sorprendente semejanza, que nos resultará difícil decir cuál es cuál. Esta semejanza de imágenes a escalas muy distintas se conoce desde antiguo, pero nadie antes de Mandelbrot había dispuesto de un lenguaje matemático para describirla.

Cuando Mandelbrot publicó su libro pionero a mitad de los años setenta, no se había dado cuenta de las conexiones entre geometría fractal y teoría del caos, pero ni él ni sus colegas matemáticos necesitaron mucho tiempo para descubrir que los atractores extraños son ejemplos exquisitos de fractales. Si se amplían fragmentos de su estructura, revelan una subestructura multinivel en la que los mismos patrones se repiten una y otra vez, hasta tal punto que se define comúnmente a los atractores extraños como trayectorias en espacio fase que exhiben geometría fractal.

Otro importante vínculo entre la teoría del caos y la geometría fractal es el cambio de cantidad a cualidad. Como hemos visto, resulta imposible predecir los valores de las variables de un sistema caótico en un momento determinado, pero *podemos* predecir las características cualitativas del comportamiento del sistema. De igual forma, es imposible calcular la longitud o área exactas de una figura fractal, pero podemos definir de un modo cualitativo su grado de «mellado».

Mandelbrot subrayó esta espectacular característica de las figuras fractales planteando una provocadora cuestión: ¿Qué longitud exacta tiene la línea costera británica? Demostró que, puesto que la longitud medida puede extenderse indelinidamente descendiendo progresivamente de escala, no existe una respuesta definitiva a la cuestión planteada. No obstante, sí es posible definir un número entre 1 y 2 que caracterice el grado de mellado+ de

dicha cosía. Para la línea costera británica, dicho número es aproximadamente 1,58, mientras que para la noruega, mucho más accidentada, es aproximadamente 1,70.[26]

Como se puede demostrar que dicho número tiene algunas propiedades de dimensión, Mandelbrot lo llamó una dimensión (racial. Podemos comprender esta idea intuitivamente si nos damos cuenta de que una línea quebrada sobre un plano llena más espacio que una línea recta, con dimensión 1, pero menos que el plano, con dimensión 2. Cuanto más quebrada la línea, más se acercará su dimensión fractal a 2. De igual manera, una hoja de papel arrugada ocupa más espacio que un plano, pero menos que una esfera. Así, cuanto más arrugada esté la hoja, más cerca de 3 estará su dimensión fractal.

Este concepto de dimensión fractal, que al principio era una idea matemática puramente abstracta, se ha convertido en una herramienta muy poderosa para el análisis de la complejidad de las figuras fractales, ya que se corresponde muy bien con nuestra percepción de la naturaleza. Cuanto más sesgados los perfiles del relámpago o los bordes de las nubes, cuanto más abrupto el perfil de cosías y montañas, mayor será su dimensión fractal.

Para representar las formas fractales que se dan en la naturaleza, podemos construir figuras geométricas que exhiban autosemejanza precisa. La principal técnica para construir estos fractales matemáticos es la iteración, es decir, la repetición de cierta operación geométrica una y otra vez. El proceso de iteración -que nos condujo a la transformación del panadero-, la característica matemática común a los atractores extraños, se revela así como la característica matemática central en el vínculo entre la teoría del caos y la geometría fractal.

Una de las figuras fractales más simples generada por iteración es la llamada curva de Koch, o curva del copo de nieve.[27] La operación geométrica consiste en dividir una línea en tres partes iguales y reemplazar la sección central por los dos lados de un triángulo equilátero, como muestra la figura 6-12. Repitiendo la operación una y otra vez en escalas cada vez menores, se crea un dentado copo de nieve (figura 6-13). Como la línea de costa de Mandelbrot, la curva de Koch devendrá infinitamente larga si prolongamos infinitamente la iteración. En realidad, la curva de Koch podría verse como un modelo muy rudimentario de línea de costa (figura 6-14).

Con la ayuda de ordenadores, iteraciones geométricas simples se pueden reproducir miles de veces a distintas escalas, para



Figura 6-12
Operación geométrica para la construcción de una curva de Koch.

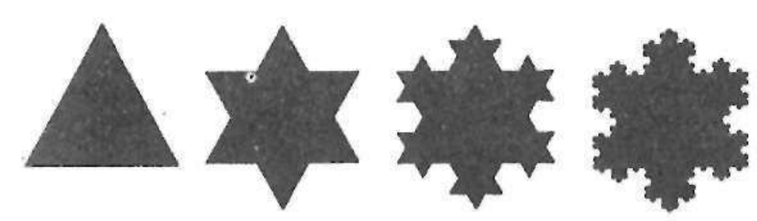


Figura 6-13
El copo de nieve de Koch.

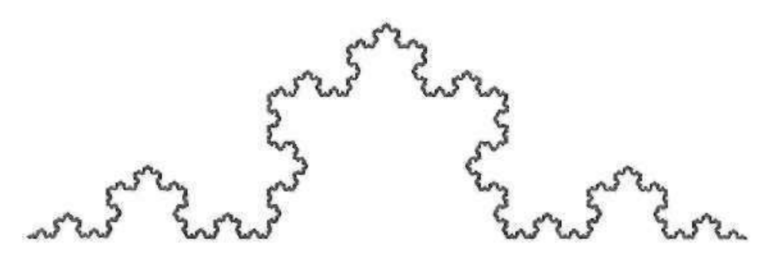


Figura 6-14
Representación de una línea de costa con la curva de Koch.

producir las llamadas falsificaciones fractales, modelos generados por computadora de plantas, árboles, montañas, líneas de costa y demás, con un sorprendente parecido a las formas reales existentes en la naturaleza. La figura 6-15 muestra un ejemplo de una de estas falsificaciones fractales. Iterando un simple dibujo de líneas a varias escalas, se genera la hermosa y compleja imagen de un helecho.

Con estas nuevas técnicas matemáticas, los científicos han podido construir modelos muy precisos de una gran variedad de formas naturales irregulares, descubriendo al hacerlo la aparición generalizada de fractales. De todos estos modelos, es quizás el patrón fractal de las nubes, que inspiraran a Mandelbrot la búsqueda de un nuevo lenguaje matemático, el más asombroso. Su autosemejanza alcanza hasta siete órdenes de magnitud, lo que significa que el borde de una nube, ampliado diez millones de veces, sigue mostrando el mismo aspecto conocido.

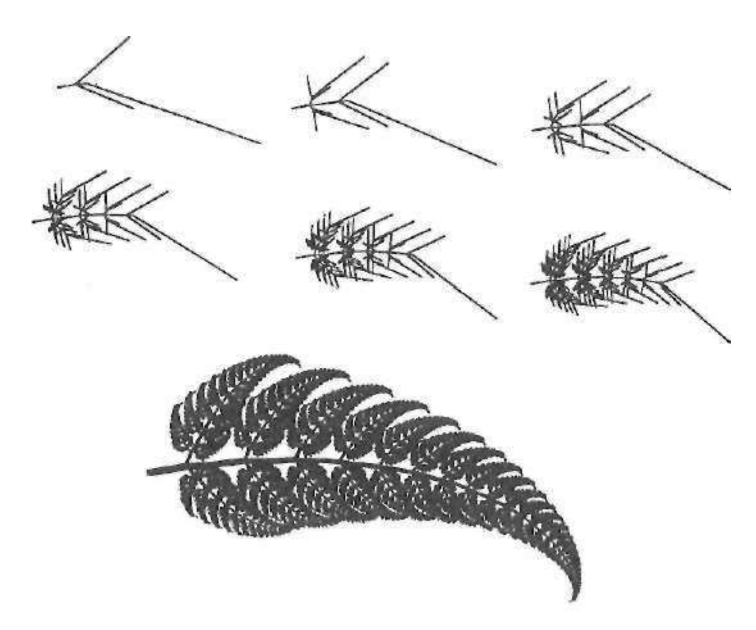


Figura 6-15
Falsificación fractal de un helecho: de García (1991).

NÚMEROS COMPLEJOS

La culminación de la geometría fractal ha sido el descubrimiento por Mandelbrot de una estructura matemática que, aun siendo de una enorme complejidad, puede ser generada con un procedimiento iterativo muy simple. Para comprender esta asombrosa figura fractal, conocida como la serie de Mandelbrot, debemos familiarizarnos primero con uno de los más importantes conceptos matemáticos: los números complejos.

El descubrimiento de los números complejos constituye un capítulo apasionante de la historia de las matemáticas.[28] Cuando el álgebra fue desarrollada en la Edad Media y los matemáticos exploraron toda clase de ecuaciones, clasificando sus resultados, muy pronto se encontraron con problemas que no tenían solución en términos de la serie de números conocidos por ellos. En particular, ecuaciones tales como $x + 5 = 3$ les condujeron a extender el concepto numérico a los números negativos, de modo que la solución ya podía escribirse como $x = -2$. Más adelante, todos los llamados números reales -enteros positivos y negativos, fracciones y números irracionales como raíces cuadradas o el famoso número pi eran representados por puntos en una sola línea numérica densamente poblada (figura 6-16).

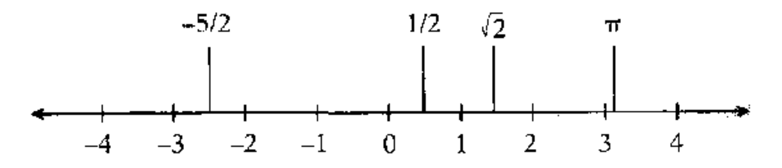


Figura 6-16
La línea numérica.

Con este concepto expandido de los números, todas las ecuaciones algebraicas se podrían resolver en principio, a excepción de aquellas que comprenden raíces cuadradas o números negativos. La ecuación $x^2 = 4$ tiene dos soluciones: $x = 2$ y $x = -2$, pero para $x^2 = -4$ parece no haber solución, puesto que ni +2 ni -2 darán -4 al ser elevados al cuadrado.

Los primeros algebristas indios y árabes se encontraban repetidamente con semejantes ecuaciones pero se resistían a anotar expresiones tales como $\sqrt{-4}$, ya que las consideraban absolutamente carentes de sentido. No será hasta el siglo XVI, cuando las raíces cuadradas de números negativos aparecerán en textos algebraicos, y aun entonces los autores se apresurarán a señalar que tales expresiones no significan realmente nada.

Descartes llamó «imaginaria» a la raíz cuadrada de un número negativo y creía que la aparición de tales números «imaginarios» en un cálculo significaba que el problema carecía de solución. Otros matemáticos usaban términos como «licticias», «sofisticadas» o «imposibles» para etiquetar estas cantidades que hoy, siguiendo a Descartes, todavía denominamos «números imaginarios».

Puesto que la raíz cuadrada de un número negativo no puede ser colocada en lugar alguno de la línea numérica, los matemáticos del siglo XIX no pudieron atribuir ningún sentido de la realidad a semejantes cantidades. El gran Leibniz, inventor del cálculo diferencial, atribuía una cualidad mística a la raíz cuadrada de - 1 , viéndola como la manifestación del «espíritu divino» y llamándola «este anfibio entre el ser y el no ser».[29] Un siglo después, Leonhard Euler, el más prolífico matemático de todos los tiempos, expresaba el mismo sentimiento en su *Álgebra* en palabras que, si bien menos poéticas, siguen expresando el mismo sentimiento de asombro:

Tocias las expresiones como $\sqrt{-1}$, $\sqrt{-2}$, etc., son consecuentemente números imposibles o imaginarios, dado que representan raíces cuadradas de cantidades negativas, y de tales números no podemos decir que sean nada, más que nada, o menos que nada, lo que necesariamente los convierte en imaginarios o imposibles.[30]

En el siglo xix, olio gigante matemático, Karl Friedrich Gauss, declaró con firmeza que «puede ser asignada a estos seres imaginarios una existencia objetiva»,[31] Gauss se daba cuenta, por supuesto, de que no babía lugar para los números imaginarios en la línea numérica, así que dio el audaz paso de colocarlos en un eje perpendicular a ésta sobre su punto cero, creando así un sistema de coordenadas cartesianas. En diebo sistema, todos los números reales se sitúan sobre el «eje real», mientras que los números imaginarios lo hacen sobre el «eje imaginario» (figura 6-17). La raíz cuadrada de -1 recibe el nombre de «unidad imaginaria» y se representa por el símbolo *i.* Puesto que la raíz cuadrada de un número negativo siempre podrá ser escrita como $\sqrt{-a} = \sqrt{-1}\sqrt{a} = i\sqrt{a}$, todos los números imaginarios pueden ser colocados sobre el eje imaginario como múltiplos de *i.*

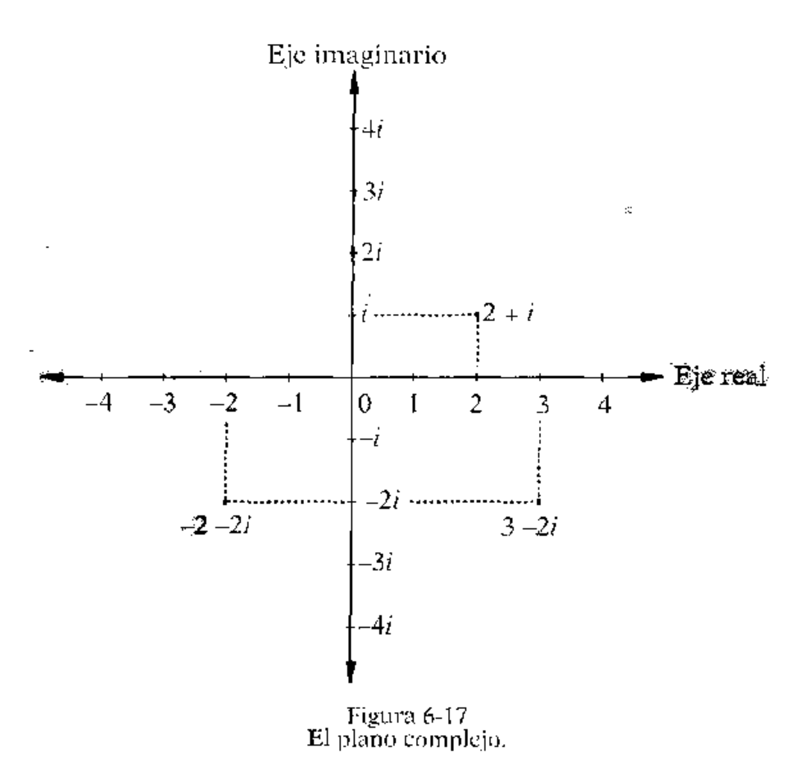


Figura 6-17
El plano complejo.

Con este ingenioso sistema, Gauss creó un espacio no sólo para los números imaginarios, sino también para todas las combinaciones posibles entre números reales e imaginarios, tales como (2 + *i),* (3 - 2 *i*), etc. Dichas combinaciones reciben el nombre de «números complejos» y están representadas por puntos del plano ocupado por los ejes real e imaginario, cuyo plano se denomina «plano complejo». En general, todo número complejo puede ser escrito como:

$$z = x + iy$$

donde x se denomina a la «parte real» e y a la «parte imaginaria».

Con la ayuda de esta definición, Gauss creó un álgebra especial para los números complejos y desarrolló muchas ideas fundamentales sobre funciones de variables complejas. Ello conduciría a una nueva rama de las matemáticas conocida como «análisis complejo», con un enorme espacio de aplicación en todos los campos de la ciencia.

PATRONES DENTRO DE PATRONES

La razón de haber efectuado esta incursión en la historia de los números complejos es que muchas imágenes fractales pueden generarse matemáticamente por procesos iterativos en el plano complejo. A finales de los años setenta, y tras publicar su libro pionero, Mandelbrot centró su atención en un determinado tipo de fractales matemáticos conocido como las series de Julia,[32] que habían sido descubiertos por el matemático francés Gastón Julia en la primera mitad de siglo, para caer después en el olvido. De hecho, Mandelbrot había conocido el trabajo de Julia en su época de estudiante, había observado sus dibujos rudimentarios (hechos a la sazón sin la ayuda de ordenadores) y había perdido pronto su interés por el tema. Ahora, no obstante, se daba cuenta de que los dibujos de Julia eran representaciones rudimentarias de complejas imágenes fractales y se dedicó a reproducirlas en todo detalle con la ayuda de los ordenadores más potentes que pudo encontrar. Los resultados fueron pasmosos.

La base de las series de Julia es la sencilla cartografía

$$z \to z^4 + c$$

en la que z es una variable compleja y c una constante compleja. El proceso iterativo consiste en tomar cualquier número z en el plano complejo, elevarlo al cuadrado, añadir la constante c, volver a elevar al cuadrado el resultado, añadirle la constante c de nuevo y así sucesivamente. Cuando esto se hace con distintos valores iniciales de z, algunos de ellos irán aumentando hacia el infinito a medida que avanza la iteración, mientras que otros se mantendrán finitos[33].Las series de Julia son el conjunto de valores de z, o puntos en el plano complejo, que permanecen finitos bajo iteración.

Si se desea lijar la forma de la serie de Julia para una determinada constante c, la iteración debe realizarse para miles de puntos y así hasta que quede claro si se incrementarán o permanecerán finitos. Si a los puntos que permanecen finitos se les adjudica el color negro y el blanco a los que tienden al infinito, la serie de Julia aparecerá finalmente como un dibujo en negro sobre blanco. Todo el proceso es muy sencillo pero tremendamente largo. Es evidente que la utilización de un ordenador de alta velocidad es esencial si se desea obtener una figura precisa en un tiempo razonable.

Para cada constante c obtendremos una diferente serie de Julia, de modo que hay un número infinito de éstas. Algunas son imágenes únicas conexas, otras están fragmentadas en varias partes inconexas y otras parecen haberse desintegrado en polvo (ver figura 6-18). Todas comparten el aspecto dentado característico de los fractales y la mayoría resultan imposibles de describir en el lenguaje de la geometría clásica. «Obtienes una increíble variedad de series de Julia», se maravilla el matemático francés Adrien Douady. «Algunas parecen gordas nubes, otras ligeras malezas de zarzas, otras se asemejan a las chispas que flotan en el aire tras un fuego de artificio, alguna tiene el aspecto de un conejo, muchas tienen colas de hipocampo.»[34]

Esta rica variedad de aspectos, muchos de los cuales recuerdan formas vivas, sería ya de por sí suficientemente sorprendente, pero lo auténticamente mágico empieza cuando ampliamos el contorno de cualquier parte de las series de Julia. Como en el caso de la nube o la línea de costa, la misma riqueza aparece en todas las escalas. Con resolución creciente, es decir, aumentando el número de decimales de z introducidos en el cálculo, aparecen más y más detalles del contorno fractal, revelando una fantástica

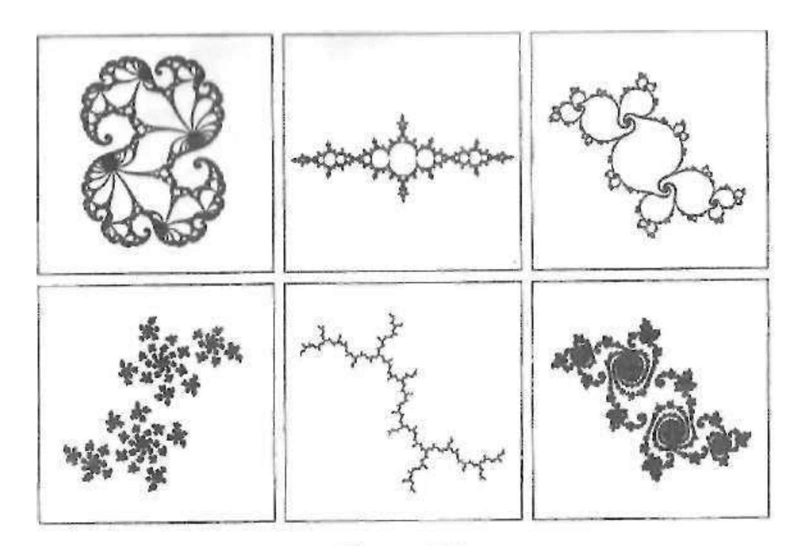


Figura 6-18
Variedades de series de Julia; de Peitgen y Richter (1986).

secuencia de patrones dentro de patrones, todos ellos similares sin ser idénticos.

Cuando Mandelbrot analizó distintas representaciones matemáticas de las series de Julia a finales de los años setenta y trató de clasificar su inmensa variedad, descubrió un modo muy sencillo de crear una sola imagen en el plano complejo que sirviese de catálogo para todas las posibles series de Julia. Esta imagen, que se ha convertido en el principal símbolo visual de las nuevas matemáticas de la complejidad, es la serie de Mandelbrot (figura 6-19). No es otra cosa que la colección de todos los puntos de la constante c en el plano complejo para los que las correspondientes series de Julia son imágenes únicas conexas. Para construir la serie de Mandelbrot, por tanto, debemos construir una serie de Julia separada para cada valor de c en el plano complejo y determinar si dicha serie es «conexa» o «inconexa». Por ejemplo, entre las series de Julia mostradas en la figura 6-18, las tres de la hilera superior y la central de la hilera inferior son conexas -es decir, consisten en una sola pieza-, mientras que las dos extremas de la hilera inferior son inconexas, puesto que constan de varias piezas.

Generar series de Julia para miles de valores de c, cada uno con miles de puntos que requieren repetidas iteraciones, parece una tarea imposible. Afortunadamente, sin embargo, existe un poderoso teorema, descubierto por el mismo Gaston Julia, que

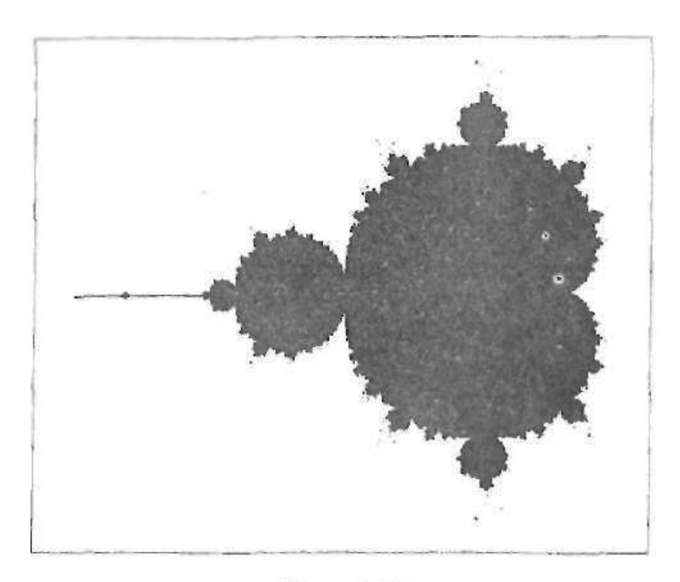


Figura 6-19
La serie de Mandelbrot; de Peitgen y Richter (1986).

reduce drásticamente el número de pasos necesario.[35] Para averiguar si una determinada serie es conexa o inconexa, todo lo que necesitamos es iterar el punto inicial z = 0. Si este punto permanece finito bajo iteración repetida, la serie de Julia correspondiente será conexa, por muy revuelta que aparezca; en caso contrario, será siempre inconexa. Por tanto, todo lo que debemos hacer para construir la serie de Mandelbrot es iterar este punto z = 0 para cada valor de c. En otras palabras, generar la serie de Mandelbrot requiere el mismo número de pasos que generar una serie de Julia.

Mientras que existe un número infinito de series de Julia, la serie de Mandelbrot es única. Esta extraña figura es el objeto matemático más complejo jamás inventado. Aunque las reglas para su construcción son muy simples, la variedad y complejidad que revela bajo una atenta observación son increíbles. Cuando se genera la serie de Mandelbrot sobre una cuadrícula preliminar, aparecen dos discos en la pantalla del ordenador: el menor aproximadamente circular, el mayor vagamente en forma de corazón. Cada uno de ellos muestra varios aditamentos en forma de disco sobre sus contornos. Una mayor resolución revela una profusión de aditamentos cada vez menores bastante parecidos a púas espinosas.

A partir de este punto, la riqueza de imágenes revelada por la ampliación creciente de los bordes de la serie (es decir, incrementando la resolución en el cálculo) resulta imposible de describir. Un recorrido como éste por la serie de Mandelbrot, preferentemente en vídeo," es una experiencia inolvidable.[36] A medida que la cámara se aproxima con el zoom y amplía el borde, parecen surgir del mismo brotes y zarcillos que, ampliados a su vez, se disuelven en una multitud de formas: espirales dentro de espirales, hipocampos y remolinos, repitiendo una y otra vez los mismos patrones (figura 6-20). En cada escala de este viaje fantástico -en el que los ordenadores actuales pueden producir ampliaciones de hasta ¡cien millones de veces!-, la imagen aparece como una costa ricamente fragmentada, pero incluyendo formas que parecen orgánicas en su inacabable complejidad. Y de vez en cuando, hacemos un misterioso descubrimiento: una diminuta réplica de toda la serie de Mandelbrot enterrada en las profundidades de la estructura de sus bordes.

Desde que la serie de Mandelbrot apareciera en la portada de *Scientific American* en agosto de 1985, cientos de entusiastas de los ordenadores han utilizado el programa iterativo publicado en aquel número para emprender su propio viaje por la serie con sus ordenadores domésticos. Se han añadido vividos colores a los patrones descubiertos en estos viajes y las imágenes resultantes han sido publicadas en numerosos libros y expuestas en muestras de arte informático alrededor del globo.[37] Contemplando estas inolvidablemente bellas imágenes de espirales en rotación, de remolinos que generan acantilados, de formas orgánicas bullendo y explosionando en polvo, no podemos evitar notar el sugestivo parecido con el arte psicodélico de los años sesenta. Este arte estuvo inspirado en viajes semejantes, facilitados no por potentes ordenadores y nuevas matemáticas, sino por el LSD y otras drogas psicodélicas.

El término *psicodélico* («manifestación mental») fue creado cuando se demostró tras una investigación minuciosa que estas drogas actúan como amplificadores o catalizadores de procesos mentales inherentes.[38] Parecería pues que los patrones fractales, tan característicos de la experiencia con LSD, debieran estar em-

* Fritjof Capra se refiere aquí a la excelente producción en vídeo que menciona en su nota n." 24 del presente capítulo, editada por Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Mönchhfstrare 15, D-6900, Heidelberg y distribuida por W. H. Freeman, 20 Beaumont Street, Oxford 0X1 2NQ.UK (ISBN 0-7167-2244-5). *(N. del T.)*

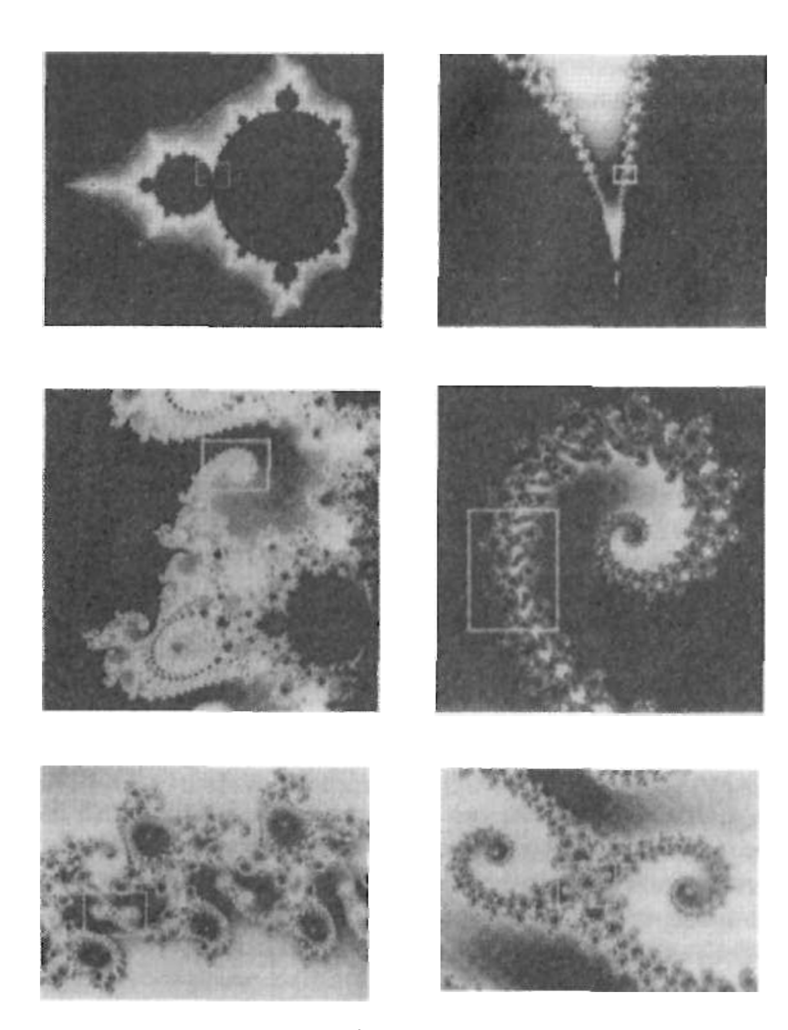


Figura 6-20
Etapas de un viaje por la serie de Mandelbrot. En cada imagen, el área de la subsiguiente ampliación está señalada por un rectángulo blanco; de Peitgen y Richter (1986).

bebidos en el cerebro humano. El hecho de que la geometría fractal y el LSD apareciesen en escena aproximadamente al mismo tiempo es una de esas sorprendentes coincidencias -¿o sincronizaciones?- que tan a menudo se han dado en la historia de las ideas.

La serie de Mandelbrot es una mina de patrones de infinito detalle y variedad. Estrictamente hablando, no es autosemejante

puesto que no sólo repite los mismos patrones una y otra vez, incluyendo pequeñas réplicas de la propia serie entera, sino que ¡contiene también elementos de un número infinito de series de Julia! Es, pues, un «superfractal» de inconcebible complejidad.

No obstante, esta estructura cuya riqueza desafía a la imaginación humana, está generada por unas pocas reglas muy simples. Así, la geometría fractal, al igual que la teoría del caos, ha obligado a científicos y matemáticos a revisar el concepto mismo de complejidad. En matemática clásica, fórmulas simples corresponden a formas simples y fórmulas complicadas a formas complicadas. En las nuevas matemáticas de la complejidad, la situación es totalmente distinta. Ecuaciones sencillas pueden generar atractores extraños enormemente complejos y reglas sencillas de iteración dan lugar a estructuras más complicadas que lo que podríamos imaginar jamás. Mandelbrot lo ve como un nuevo y apasionante desarrollo de la ciencia:

> Se trata de una conclusión muy optimista ya que, después de todo, el sentido inicial del estudio del caos era el intento de encontrar reglas sencillas para el universo que nos rodea (...). El esfuerzo siempre fue buscar explicaciones simples para realidades complejas. Pero la discrepancia entre simplicidad y complejidad nunca fue comparable con lo que nos hemos encontrado en este contexto.[39]

Mandelbrot ve también el tremendo interés despertado por la geometría fractal fuera de la comunidad matemática como un avance saludable. Espera que ello contribuirá a romper el aislamiento de las matemáticas de otras actividades humanas y la consiguiente ignorancia del lenguaje matemático, existente incluso entre personas altamente educadas en otros aspectos.

Este aislamiento de las matemáticas es un chocante signo de nuestra fragmentación intelectual y, como tal, se trata de un fenómeno relativamente reciente. A través de los siglos, muchos de los grandes matemáticos han hecho también contribuciones importantes en otros campos. En el siglo XI, el poeta persa Ornar Khayyám, conocido mundialmente como el autor del *Rubáiyát,* escribió también un tratado pionero de álgebra y sirvió como astrónomo oficial en la corte del califa. Descartes, el fundador de la filosofía moderna, era un brillante matemático así como un médico experimentado. Los dos inventores del cálculo diferencial, Newton y Leibniz, desarrollaron actividades en muchos campos

además de Las matemáticas. Newton era un «filósofo natural» que aportó contribuciones fundamentales a prácticamente todas las ramas de la ciencia conocidas en su tiempo, además de estudiar alquimia, teología e historia. Se conoce a Leibniz básicamente como filósofo, pero fue también el fundador de la lógica simbólica, diplomático e historiador durante la mayor parte de su vida. El gran matemático Gauss fue también físico y astrónomo e inventó diversos instrumentos muy útiles, entre ellos el telégrafo eléctrico.

Estos ejemplos, a los que se podrían añadir muchos más, muestran que a lo largo de nuestra historia intelectual, las matemáticas nunca estuvieron separadas de otras áreas del conocimiento y la actividad humanos. En el siglo xx, sin embargo, el incremento del reduccionismo, la fragmentación y la especialización han conducido a un aislamiento extremo de las matemáticas, incluso dentro de la comunidad científica. Así el teórico del caos Ralph Abraham recuerda:

> Cuando inicié mi trabajo profesional como matemático en 1960, de lo cual no hace tanto tiempo, las matemáticas modernas en su totalidad -en su totalidad- eran rechazadas por los físicos, incluso por los más avanzados físicos matemáticos... Todo lo que era un año o dos anterior a lo que había utilizado Einstein era rechazado... Los físicos matemáticos rehusaban dar permiso a sus estudiantes para asistir a cursos impartidos por matemáticos: «Tomad las matemáticas de nosotros. Os enseñaremos todo lo que necesitáis saber...» Esto era en 1960. En 1969, todo había cambiado completamente.[40]

La gran fascinación ejercida por la teoría del caos y la geometría fractal en personas de todas las disciplinas -desde científicos a empresarios y artistas-, puede constituir efectivamente una señal esperanzadora de que el aislamiento de las matemáticas está tocando a su fin. Las nuevas matemáticas de la complejidad están haciendo que hoy cada vez más personas se den cuenta de que las matemáticas son mucho más que frías fórmulas, que la comprensión del patrón es crucial para el entendimiento del mundo vivo que nos rodea y que todas las cuestiones de patrón, orden y complejidad son esencialmente matemáticas.

Cuarta parte

La naturaleza de la vida

7. UNA NUEVA SÍNTESIS

Volvamos por un momento al tema central del presente libro: ¿qué es vida? En mi tesis, he argumentado que está emergiendo en la actualidad una teoría de sistemas vivos que es consecuente con el marco filosófico de la ecología profunda, que comprende un lenguaje matemático adecuado y que implica una comprensión no mecanicista y poscartesiana de la vida.

PATRÓN Y ESTRUCTURA

La aparición y elaboración del concepto de «patrón de organización» ha sido un elemento crucial en el desarrollo de esta nueva forma de pensar. Desde Pitágoras hasta Aristóteles, Goethe y los biólogos organicistas, hay una continua tradición intelectual que se debate por la comprensión de la forma viviente. Alexander Bogdanov fue el primero en intentar la integración de los conceptos de organización, patrón y complejidad en una teoría de sistemas coherente. Los cibernéticos se centraron en los patrones de comunicación y control -en particular en las pautas de circularidad causal subyacentes en el concepto de retroalimentación-, y al hacerlo, fueron los primeros en distinguir claramente el patrón de organización de un sistema, de su estructura física.

Las «piezas del rompecabezas» que faltaban -el concepto de autoorganización y las nuevas matemáticas de la complejidad-han sido identificadas y analizadas a lo largo de los últimos veinte años. Una vez más, la noción de patrón ha sido fundamental para ambos acontecimientos. El concepto de autoorganización se originó en el reconocimiento de la red como patrón general de vida, refinado posteriormente por Maturana y Várela en su concepto de autopoiesis. Las nuevas matemáticas de la complejidad

son esencialmente unas matemáticas de patrones visuales -atractores extraños, retratos fase, fractales, etc.-, que se analizan dentro del marco de la topología planteado por Poincaré.

La comprensión del patrón será pues de crucial importancia para la comprensión científica de la vida. No obstante, para el completo entendimiento de un sistema vivo, la comprensión de su patrón de organización -si bien críticamente importante- no resulta suficiente. Necesitamos también comprender la estructura del sistema. De hecho, hemos visto cómo el estudio de la estructura ha sido el principal planteamiento de la ciencia occidental, eclipsando una y otra vez el estudio del patrón.

He llegado a la convicción de que la clave para una teoría completa de los sistemas vivos estriba precisamente en la síntesis de estos dos planteamientos: el estudio del patrón (forma, orden, cualidad) y el de la estructura (substancia, materia, cantidad). Seguiré a Humberto Malurana y Francisco Varela en sus definiciones para ambos criterios clave de un sistema vivo: su patrón de organización y su estructura.[1] El *patrón de organización* de cualquier sistema, vivo o no, es la configuración de las relaciones entre sus componentes, que determina las características esenciales del sistema. Dicho de otro modo, ciertas relaciones deben estar presentes para que algo sea reconocible como una silla, una bicicleta o un árbol. Esta configuración de relaciones que le otorga al sistema sus características esenciales, es lo que entendemos como su patrón de organización.

La *estructura* de un sistema es la corporeización física de su patrón de organización. Mientras que la descripción del patrón de organización implica una cartografía abstracta de relaciones, la descripción de la estructura implica la de sus componentes lisíeos presentes: sus formas, sus composiciones químicas, etc.

Para ilustrar la diferencia entre patrón y estructura, tomemos un sistema no vivo bien conocido: una bicicleta. Para que algo pueda ser llamado una bicicleta, deberá existir un número de relaciones funcionales entre sus componentes conocidos como cuadro, pedales, manillar, ruedas, cadena, ruedas dentadas, etc. La configuración completa de estas relaciones funcionales constituye el patrón de organización de la bicicleta.

La estructura de la bicicleta es la manifestación física de su patrón de organización en términos de componentes de formas específicas, hechos de materiales específicos. El mismo patrón «bicicleta» puede manifestarse a través de muchas estructuras distintas. El manillar tendrá distinta forma para una bicicleta de

pasco, otra de calieras y una de montaña; el cuadro podrá ser pesado y sólido o ligero y delicado, los neumáticos podrán ser estrechos o anchos, tubulares o macizos. Todas estas combinaciones v muchas otras serán reconocidas como diferentes manifestaciones físicas del mismo patrón de relaciones que define a una bicicleta.

LOS TRES CRITERIOS CLAVES

En una máquina tal como una bicicleta, las partes han sido diseñadas, fabricadas y ensambladas para formar una estructura con componentes fijos. En un sistema vivo, por el contrario, los componentes cambian continuamente. Hay un flujo incesante de materia y energía a través del organismo. Cada célula sintetiza y disuelve continuamente estructuras y elimina productos de desecho. Tejidos y organismos reemplazan sus células en ciclos continuos. Hay crecimiento, desarrollo y evolución. Así, desde el mismo inicio de la biología, la comprensión de la estructura viva ha sido inseparable del entendimiento de los procesos metabólicos y relativos al desarrollo.[2]

Esta sorprendente propiedad de los sistemas vivos sugiere el *proceso* como tercer criterio para una completa descripción de la naturaleza de la vida. El proceso vital es la actividad que se ocupa de la continua corporeización del patrón de organización del sistema. Así pues, el criterio de proceso constituye el vínculo entre patrón y estructura. En el caso de nuestra bicicleta, el patrón de organización está representado por los dibujos de proyecto necesarios para su construcción, la estructura por la bicicleta específica física y el vínculo entre patrón y estructura por el proceso mental de su diseñador. En el caso de un organismo vivo, en cambio, el patrón de organización siempre está corporeizado por la estructura del sistema, mientras que el vínculo entre patrón y estructura reside en el proceso de continua corporeización.

El criterio de proceso completa el marco conceptual de mi síntesis de la emergente teoría de sistemas vivos. Las definiciones de los tres criterios -patrón, estructura y proceso- están reflejadas una vez más en la tabla adjunta. Los tres criterios son totalmente interdependientes. El patrón de organización sólo puede ser reconocido si está corporeizado en una estructura física, siendo éste un proceso continuo en los organismos vivos. Así pues, estructura y proceso están inextricablemente unidos. Podríamos decir que

los tres criterios -patrón, estructura y proceso- constituyen tres perspectivas distintas pero inseparables del fenómeno de la vida. Ellas serán las tres dimensiones conceptuales de mi síntesis.

Comprender la estructura de la vida desde un punto de vista sistémico significa identificar un conjunto de crilerios generales a través de los cuales podemos establecer una clara distinción entre sistemas vivos y no vivos. A través de la historia de la biología, han sido sugeridos muchos criterios, pero todos ellos demostraron ser de algún modo insuficientes. No obstante, las recientes formulaciones de modelos de autoorganización y las matemáticas de la complejidad indican que es ahora posible la identificación de tales criterios. La idea clave de mi síntesis es expresar estos criterios en términos de las tres dimensiones conceptuales antes mencionadas: patrón, estructura y proceso.

En pocas palabras, propongo el entendimiento de: la *autopoiesis* -tal como es definida por Maturana y Varela- como el patrón de vida (es decir, el patrón de organización de los sistemas vivos);[3] *la estructura disipativa* -tal como es definida por Prigogine- como la estructura de los sistemas vivos;[4] y la *cognición* -tal como es definida inicialmente por Gregory Bateson y más plenamente por Maturana y Varela- como el proceso vital.

El patrón de organización determina las características esenciales de un sistema. En particular, determina si el sistema es vivo o no vivo. La autopoiesis -el patrón de organización de los sistemas vivos- es pues la característica definitoria de vida en la nueva teoría. Para determinar si un sistema -un cristal, un virus, una célula o el planeta Tierra- está o no vivo, todo lo que debemos averiguar es si su patrón de organización corresponde al de una red autopoiésica. Si es así, estaremos tratando con un sistema vivo; en caso contrario, se tratará de un sistema no vivo.

La cognición -el proceso de vida- está inextricablemente unida a la autopoiesis, como veremos más adelante. La autopoiesis y la cognición son dos aspectos distintos del mismo proceso de vida. En la nueva teoría, todos los sistemas vivos son sistemas cognitivos y la cognición implica siempre la existencia de una red autopoiésica.

Con el tercer criterio de vida -la estructura de los sistemas vivos-, la situación es ligeramente distinta. Si bien la estructura de un sistema vivo es siempre una estructura disipativa, no todas las estructuras disipativas son redes aulopoiésicas. Así pues, una estructura disipaliva podrá ser un sistema vivo o no vivo. Por ejemplo, las células de Bénard y los relojes químicos estudiados exten-

Criterios clave de un sistema vivo

patrón de organización
la configuración de las relaciones que determina las características esenciales del sistema

estructura
la corporeización física del patrón de organización del sistema

proceso vital
la actividad involucrada en la continua corporeización física del patrón de organización del sistema

samente por Prigoginc, son estructuras disipativas pero no son sistemas vivos.[5]

Los tres criterios clave para la vida y sus teorías subyacentes, serán discutidos en detalle en los capítulos siguientes. En este punto deseo simplemente ofrecer una breve visión de conjunto.

AUTOPOIESIS: EL PATRÓN DE VIDA

Desde principios de siglo se conoce que el patrón de organización de un sistema vivo es siempre un patrón de red.[6] No obstante, sabemos también que no todas las redes son sistemas vivos. Según Maturana y Varela, la característica fundamental de una red viviente es que se está produciendo a sí misma continuamente. Por tanto, «el ser y el hacer de (los sistemas vivos) son inseparables y éste es su modo específico de organización».[7] La autopoiesis, el «hacerse a sí mismo», es un patrón de red en el que la función de cada componente es participar en la producción o transformación de otros componentes de la red, de tal modo que ésta se hace a sí misma continuamente. Es producida por sus componentes y, a su vez, los produce.

El sistema vivo más simple conocido es la célula. Maturana y Varela han usado extensivamente la biología celular para explorar los detalles de las redes autopoiésicas. El patrón básico de la autopoiesis puede ilustrarse adecuadamente mediante una célula vegetal. La figura 7-1 muestra una imagen simplificada de una de estas células, en la que se han dado nombres descriptivos a sus componentes. Los términos técnicos correspondientes, derivados del griego y del latín, están listados en el glosario adjunto.

Como toda célula, la vegetal consiste en una membrana que contiene Quicio celular. Este fluido es un rico «caldo» molecular de nutrientes celulares, es decir, de los elementos químicos que precisa la célula para construir sus estructuras. Suspendidos en el fluido celular encontramos el núcleo, un gran número de diminutos centros de producción y varias partes especializadas llamadas orgánulos, análogos a los órganos corporales. Los más importantes de entre dichos orgánulos son los sacos de almacenaje, los centros de reciclaje, las centrales de producción de energía y las estaciones solares. Al igual que la célula como un todo, el núcleo y los orgánulos están rodeados de membranas semipermeables que seleccionan lo que entra y lo que sale. La membrana celular, en particular, admite alimento y expulsa residuos.

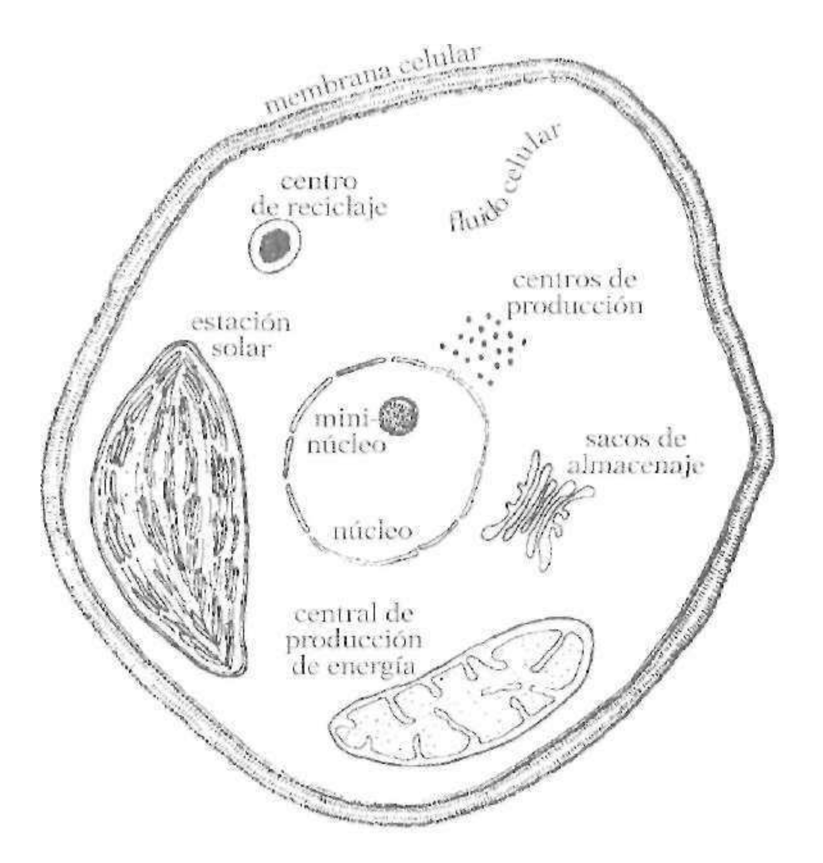


Figura 7-1
Componentes básicos de una célula vegetal.

Glosario de términos técnicos

- fluido celular: *citoplasma* («fluido celular»)
- mininúcleo: *nucleolo* («núcleo pequeño»)
- centro de producción: *ribosoma;* compuesto de *ácido ribonucleico* (ARN) y m*icrosoma* («cuerpo microscópico»), indicando un minúsculo gránulo conteniendo ARN
- saco de almacenaje: *aparalo de Golgi* (nombrado así en honor de] médico italiano Gamillo Golgi)
- centro de reciclaje: l*isosoma* («cuerpo de disolución»)
- central de producción de energía: *niitocondria* («gránulo en forma de fibra»)
- portador de energía: *trifosfato de adenosina* (ATP), compuesto químico consistente en una base, un azúcar y tres fosfatos.*
- estación solar: *cloroplasto* («hoja verde»)

El núcleo celular contiene el material genético, moléculas de ADN portadoras de la información genética y de ARN, producidas por el ADN para transmitir instrucciones a los centros de producción.[8] El núcleo contiene también un «mininúcleo» donde se preparan los centros de producción antes de ser distribuidos por toda la célula.

Los centros de producción son cuerpos granulares en los que se producen las proteínas de la célula. Éstas incluyen tanto proteínas estructurales como enzimas, los catalizadores que promueven lodos los procesos celulares. Existen alrededor de quinientos mil centros de producción en cada célula.

Los sacos de almacenaje son bolsas planas, algo así como pitas** amontonadas, donde varios productos celulares son almacenados, empaquetados, etiquetados y enviados a sus destinos.

Los centros de reciclaje son orgánulos que contienen enzimas para la digestión del alimento, de componentes celulares dañados y de diversas moléculas no utilizadas. Los elementos defectuosos son así reciclados y utilizados para la construcción de nuevos componentes celulares.

* Coenzima de extraordinaria importancia en numerosas reacciones metabólicas, compuesta de adenina, ribosa v tres moléculas de ácido fosfórico. *(N.delT.)*

** Panecillo o bollo plano, de origen libanes, enleramenle cerrado y hueco por dentro que, una vez cortado por su radio o por una paralela a éste, se rellena con comida muy diversa. (TV. *del T.)*

Las centrales de producción de energía se encargan de la respiración celular, en otras palabras, usan oxígeno para fragmentar moléculas orgánicas en dióxido de carbono y agua. Esto libera energía que queda atrapada en portadores de energía especiales. Estos son complejos compuestos moleculares que viajan a otras partes de la célula para aportar energía a los procesos celulares, conocidos colectivamente como «metabolismo celular». Los portadores de energía sirven como las unidades principales de energía de la célula, algo así como la moneda en la economía humana.

Se ha descubierto recientemente que las centrales de producción de energía contienen su propio material genético y se replican con independencia de la replicación de la célula. Según una teoría de Lynn Margulis, evolucionaron desde simples bacterias que pasaron a habitar en células complejas mayores, hace aproximadamente dos mil millones de años.[9] Desde entonces, se han convertido en residentes permanentes de todos los organismos superiores, pasando de generación en generación y viviendo en íntima simbiosis con cada célula.

Como las centrales de producción de energía, las estaciones solares contienen su propio material genético y se autorreproducen, pero sólo se pueden encontrar en las plantas verdes. Constituyen los centros de la fotosíntesis, que transforman la energía solar, el dióxido de carbono y el agua, en azúcares y oxígeno. Para complementar los azúcares, las plantas absorben también nutrientes y oligoelementos de la tierra a través de sus raíces.

Vemos que, incluso para dar una idea aproximada de la organización celular, la descripción de sus componentes debe ser bastante detallada. La complejidad aumenta espectacularmente cuando intentamos describir cómo dichos componentes están vinculados entre sí por una vasta red que involucra miles de procesos melabólicos. Las enzimas por sí solas forman una intrincada red de reacciones catalíticas promoviendo todos los procesos metabólicos, mientras que los portadores de energía forman su correspondiente red energética para nutrirlos. La figura 7-2 muestra otra imagen simplificada de una célula vegetal, en esta ocasión con varias flechas indicando algunos de los vínculos de la red de procesos metabólicos.

Para ilustrar la naturaleza de esta red, observemos un único bucle. El ADN en el núcleo produce moléculas de ARN, que contienen instrucciones para la producción de proteínas, incluyendo enzimas. Entre éstas hay un grupo de enzimas especiales capaces de reconocer, retirar y reemplazar secciones dañadas de ADN.[10] La figura 7-3 es una representación esquemática de algunas de las relaciones

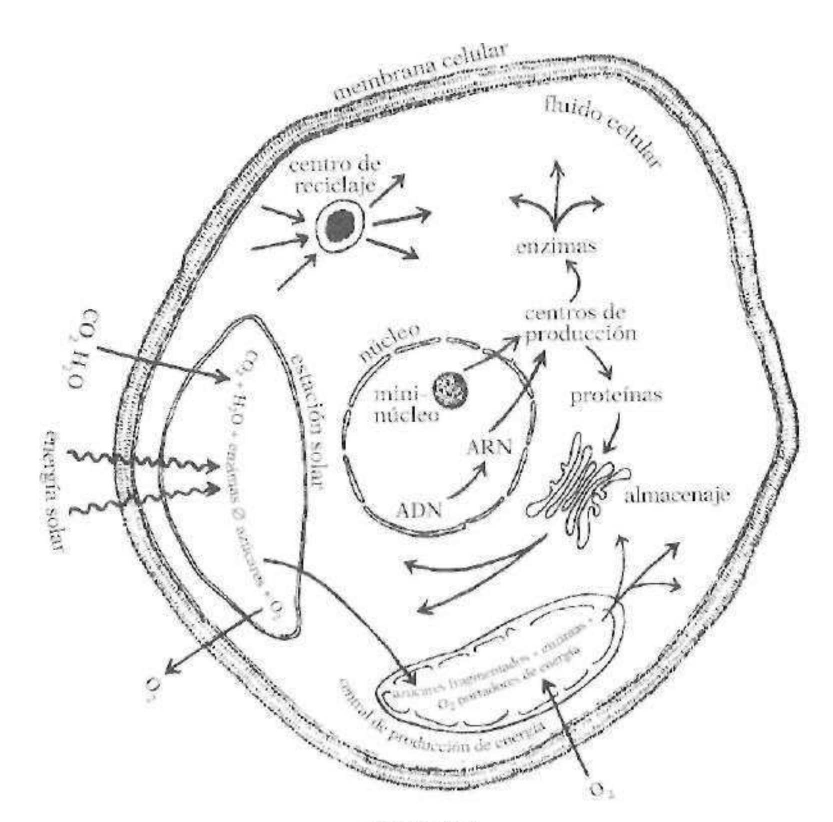


Figura 7-2
Procesos metabólicos en una célula vegetal.

comprendidas en este bucle. El ADN produce el ARN, quien transmite instrucciones a los centros de producción de enzimas, que entran en el núcleo de la célula para reparar el ADN. Cada componente en esta red parcial ayuda a producir o transformar otros componentes, luego la red es claramente autopoiésica. El ADN produce el ARN, éste especifica las enzimas y éstas reparan el ADN.

Para completar la imagen, deberíamos añadir los componentes básicos con los que están hechos el ADN, el ARN y las enzimas; los portadores de energía alimentando cada uno de los procesos descritos; la generación de energía en las correspondientes plantas desde azúcares fragmentados; la producción de azúcares por fotosíntesis en las estaciones solares, etc., etc. Con cada añadido a la red, veríamos que los nuevos componentes ayudan también a producir y transformar otros componentes, con lo que la

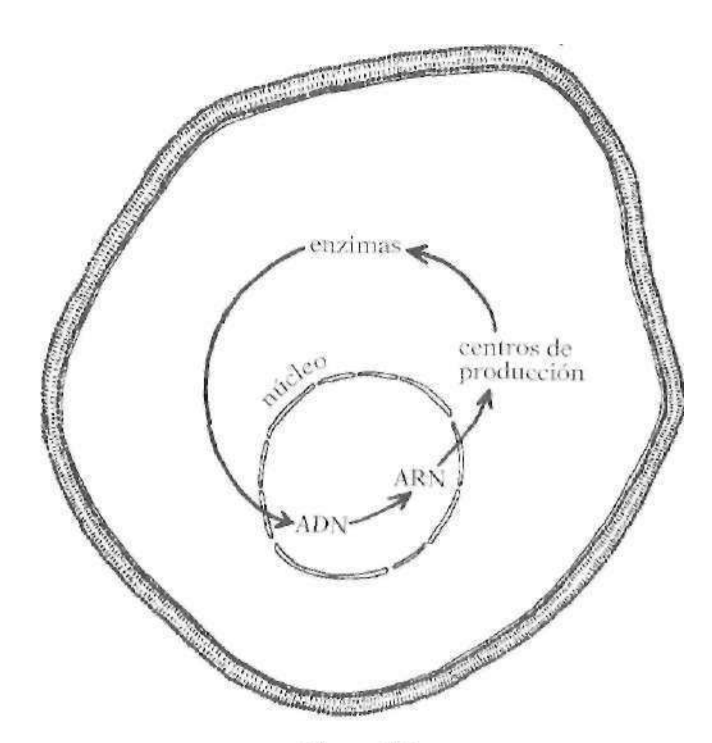


Figura 7-3
Componentes de la red autopoiésica involucrada
en la reparación de ADN.

naturaleza autopoiésica o autocreadora de toda la red resultaría aún más evidente.

El caso de la membrana celular es especialmente interesante. Es el límite de la célula, formado por algunos de los componentes de ésta, que encierra la red de procesos metabólicos, limitando así su extensión. Al mismo tiempo, la membrana participa en la red seleccionando las materias primas para los procesos de producción (el alimento de la célula) a través de filtros especiales y disipando los residuos en el medio exterior. De este modo, la red autopoiésica crea sus propios límites, que definen a la célula como sistema propio, que participa al mismo tiempo activamente en una red mayor.

Puesto que todos los componentes de una red autopoiésica son producidos por otros componentes de la red, el sistema completo es *organizativamente cerrado,* a pesar de ser abierto en relación con los flujos de materia y energía. Esta clausura organizativa implica que un sistema vivo es autoorganizador, en el sentido de que su orden y comportamiento no son impuestos desde el exterior, sino establecidos por el propio sistema. En otras palabras, los sistemas vivos son autónomos, lo cual no significa que estén aislados del exterior. Bien al contrario, interactúan con el medio a través de un constante intercambio de materia y energía, pero esta interacción no determina su organización; son autoorganizadores. La autopoiesis es pues contemplada como el patrón subyacente en el fenómeno de la autoorganización o autonomía, tan característico de todos los sistemas vivos.

A través de sus interacciones con el medio, los organismos vivos se mantienen y renuevan a sí mismos continuamente, utilizando para ello energía y recursos del medio. Además, la continua autogeneración incluye también la habilidad para formar nuevas estructuras y patrones de comportamiento. Vcrernos que esta creación de novedad, que da lugar al desarrollo y la evolución, es un aspecto intrínseco de la autopoiesis.

Un sutil pero importante punto en la definición de autopoiesis es el hecho de que una red autopoiésica no es un conjunto de relaciones entre *componentes* estáticos (como, por ejemplo, el patrón de organización de un cristal), sino un conjunto de relaciones entre *procesos ¿le producción* de componentes. Si estos procesos se detienen, lo hace también toda la organización. En otras palabras, las redes autopoiésicas deben regenerarse continuamente para mantener su organización. Ésta es, por supuesto, una característica bien conocida de la vida.

Maturana y Varela ven la diferencia entre relaciones de componentes estáticos y relaciones entre procesos, como la distinción clave entre fenómenos físicos y fenómenos biológicos. Puesto que los procesos en un fenómeno biológico involucran a componentes, resulta siempre posible abstraer de los mismos una descripción en términos puramente físicos. No obstante, los autores argumentan que una descripción puramente física no representará fielmente el fenómeno biológico. Una explicación biolé)gica -mantienen- debe ser hecha en términos de relaciones entre procesos, dentro del contexto de la autopoiesis.

ESTRUCTURA DTSIPATIVA: LA ESTRUCTURA DE LOS SISTEMAS VIVOS

Cuando Maturana y Varela describen el patrón de vida como una red autopoiésica, ponen énfasis en la clausura organizativa

de dicho patrón. Como contraste, cuando Ilya Prigogine describe la estructura de un sistema vivo como una estructura disipativa, eníatiza la apertura de esta estructura al flujo de materia y energía. Así, un sistema vivo es a la vez abierto y cerrado: abierto estructuralmente, pero cerrado organizativamente. La materia y la energía fluyen a través de él, pero el sistema mantiene una forma estable y lo hace de manera autónoma, a través de su autoorganización.

Para subrayar la aparentemente paradójica coexistencia de cambio y estabilidad, Prigogine acuñó el término «estructuras disipativas». Como ya he mencionado, no todas las estructuras disipativas son sistemas vivos, y para visualizar la coexistencia de flujo continuo y estabilidad estructural es más fácil lijarse en simples estructuras disipativas no vivientes. Una de las más simples estructuras de este tipo es un vórtice de agua fluyente, por ejemplo, el remolino en el desagüe de una bañera. El agua fluye continuamente a través del vórtice, si bien su forma característica -las bien conocidas espirales y embudo- permanece estable (figura 7-4). Es una estructura disipativa.

Una observación más próxima del origen y progresión de un vórtice así revela una serie de fenómenos bastante complejos.[11] Imaginemos una bañera conteniendo poca agua en reposo. Cuando abrimos el desagüe, el agua empieza a salir, fluyendo radialmente hacia el desagüe y aumentando su velocidad a medida que se acerca al agujero, bajo la fuerza aceleradora de la gravedad. De este modo, se establece un flujo uniforme. No obstante, el flujo no se mantendrá en este estado uniforme por mucho tiempo.

Pequeñas irregularidades en el movimiento del agua, movimientos de aire sobre la superficie del agua, e irregularidades en el desagüe provocarán una diferencia de afluencia de agua entre ambos lados, con lo que se inicia un movimiento rotativo en espiral en el flujo.

A medida que las moléculas de agua son arrastradas desagüe abajo, tanto su velocidad radial como su velocidad rotacional aumentan. Se aceleran radialmente debido a la fuerza aceleradora de gravedad y aumenta su velocidad rotacional a medida que el radio de su rotación disminuye, de modo semejante a un patinador que repliega sus brazos durante una pirueta.[12] Como resultado, las partículas de agua se mueven hacia abajo en espirales, formando un tubo de líneas de flujo que se estrecha, conocido como tubo en vórtice.

Como que el flujo básico se mantiene constante radialmente

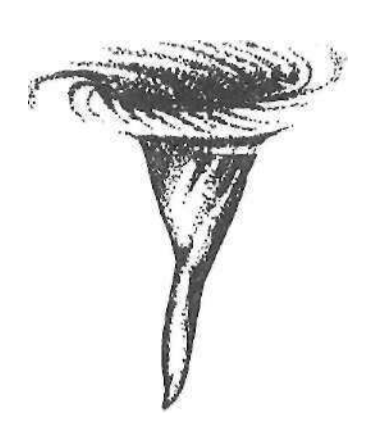


Figura 7-4
Embudo en forma de vórtice en el remolino de un desagüe.

hacia dentro, el tubo en vórtice se ve continuamente comprimido por el agua ejerciendo presión sobre él desde todos los lados. Esta presión disminuye su radio, intensificando así la rotación. Utilizando el lenguaje de Prigogine, podemos decir que la rotación introduce una inestabilidad en el flujo uniforme inicial. La fuerza de la gravedad, la presión del agua y el radio en disminución constante del tubo en vórtice se combinan para acelerar el movimiento en espiral hacia velocidades cada vez mayores.

No obstante, esta aceleración constante no acaba en una catástrofe, sino en un nuevo estado estable. Llegada una cierta velocidad de rotación, intervienen las fuerzas centrífugas, empujando el agua radialmente fuera del desagüe. Así, la superficie del agua sobre el desagüe desarrolla una depresión que se convierte rápidamente en un embudo. Eventualmente, se forma un tornado de aire en miniatura en el interior de este embudo, creando estructuras lineales y no-lineales altamente complejas -rizos, olas y remolinos- en la superficie del agua dentro del vórtice.

Al final, la fuerza de gravedad tirando del agua desagüe abajo, la presión del agua apretando hacia dentro y las fuerzas centrífugas tirando hacia fuera se equilibran recíprocamente con el resultado de un nuevo estado estable, en el que la gravedad mantiene el flujo de energía a la escala mayor, mientras que la fricción disipa parte de ella a escalas inferiores. Las fuerzas actuantes se encuentran ahora vinculadas por bucles de retroalimentación autoequilibradora, que otorgan gran estabilidad a la estructura del vórtice como un todo.

Semejantes estructuras disipativas de gran estabilidad aparecen en tormentas bajo determinadas condiciones atmosféricas. Huracanes y tornados son vórtices de aire en violenta rotación, capaces de recorrer largas distancias y desencadenar fuerzas destructivas, sin experimentar cambios significativos en sus estructuras en vórtice. Los fenómenos detallados involucrados en estos vórtices atmosféricos son de una riqueza mucho mayor a la de los que intervienen en el remolino de nuestra bañera, ya que entran en juego nuevos factores tales como diferencias de temperatura, expansiones y contracciones de aire, efectos de humedad, condensaciones, evaporaciones, etc. Las estructuras resultantes son por tanto mucho más complejas que los remolinos en agua fluyente y muestran una mayor variedad de comportamientos dinámicos. Las tormentas pueden convertirse en estructuras disipativas con tamaños y aspectos característicos, algunas de las cuales, bajo determinadas condiciones, pueden incluso escindirse en dos.

Metafóricamente, podemos visualizar una célula como un remolino, es decir, como una estructura estable con materia y energía Huyendo constantemente a través de ella. No obstante, las fuerzas y procesos que intervienen en una célula son bastante distintos -y muchísimo más complejos- que los que lo hacen en un vórtice. Mientras que las fuerzas en equilibrio en el remolino son mecánicas, siendo la dominante la de la gravedad, en el caso de la célula son químicas. Más precisamente, son los bucles catalíticos en la red autopoiésica de la célula los que actúan como bucles de alimentación autoequilibradores.

De forma semejante, el origen de la inestabilidad del remolino es mecánico, pues surge como consecuencia del movimiento rotatorio inicial. En una célula hay tres clases distintas de inestabilidad, de naturaleza más bien química que mecánica. Se originan también en los ciclos catalíticos que son la característica central de todos los procesos metabólicos. La propiedad crucial de dichos procesos es su habilidad para actuar como bucles no sólo autoequilibradores, sino también autoamplificadores, lo que puede llevar al sistema más y más lejos del equilibrio, hasta alcanzar un umbral de estabilidad. Este momento recibe el nombre de «punto de bifurcación». Es un momento de inestabilidad, en el que nuevas formas de desorden pueden surgir espontáneamente, originando el desarrollo y la evolución.

Matemáticamente, un punto de bifurcación representa un cambio impresionante en la trayectoria del sistema en espacio

fase.[13] Puede aparecer súbitamente un nuevo atractor, de modo que el comportamiento del sistema como un todo «bifurca» -se desvía- en una nueva dirección. Los estudios detallados de Prigogine sobre estos puntos de bifurcación han revelado algunas propiedades fascinantes de las estructuras disipativas, como veremos en otro capítulo.[14]

Las estructuras disipativas formadas por remolinos o huracanes pueden mantener su estabilidad sólo mientras se dé un flujo constante de materia, desde el medio a través del sistema. De modo parecido, una estructura disipativa viva, como un organismo, necesita un flujo continuo de aire, agua y alimento desde el medio a través del sistema para permanecer viva y mantener su orden. La vasta red de procesos metabólicos mantiene el sistema en un estado alejado del equilibrio, dando origen a bifurcaciones a través de sus bucles de retroalimentación inherentes y, en consecuencia, al desarrollo y a la evolución.

COGNICIÓN: EL PROCESO DE LA VIDA

Los tres criterios clave para la vida -patrón, estructura y proceso- están tan íntimamente entrelazados que resulta difícil su análisis por separado, si bien es importante distinguirlos. La autopoiesis, el patrón de vida, es un conjunto de relaciones entre *procesos* de producción, y una estructura disipativa sólo puede ser entendida en términos *de procesos* metabólicos y de desarrollo. La dimensión proceso está pues implícita, tanto en el criterio de patrón como en el de estructura.

En la teoría emergente de los sistemas vivos, los procesos vitales -la continua corporeización de un patrón autopoiésico de organización en una estructura disipativa- son identificados con la cognición, el proceso de conocer. Ello implica un concepto radicalmente nuevo de mente, que es quizás el más revolucionario y apasionante aspecto de esta teoría, ya que conlleva la promesa de la trascendencia de la división cartesiana entre mente y materia.

De acuerdo con la teoría de los sistemas vivos, la mente no es una *cosa,* sino un *proceso:* el proceso mismo de la vida. En otras palabras, la actividad organizadora de los sistemas vivos, a todos los niveles de vida, es una actividad mental. Las interacciones de un organismo vivo -planta, animal o humano- con su entorno son interacciones cognitivas, mentales. Así, vida y cognición quedan inseparablemente vinculadas. La mente -o más precisamen-

te el proceso mental- es inmanente en la materia a todos los niveles de vida.

El nuevo concepto de mente fue desarrollado independientemente durante los años sesenta por Gregory Bateson v Humberto Maturana. Bateson, participante habitual de las legendarias Conferencias de Macy durante los primeros años de la cibernética, fue un pionero en la aplicación del pensamiento sistémico y los principios cibernéticos en distintas áreas.[15] En particular, desarrolló un planteamiento sistémico para la enfermedad mental y un modelo cibernético de alcoholismo que le condujeron a definir el «proceso mental» como un fenómeno sistémico característico de los organismos vivos.

Bateson estableció una serie de criterios que los sistemas deben cumplir para que pueda existir la mente.[16] Todo sistema que satisfaga dichos criterios será capaz de desarrollar los procesos que asociamos con la mente: aprendizaje, memorización, toma de decisiones, etc. De acuerdo con Bateson, estos procesos mentales son una consecuencia necesaria e inevitable de una cierta complejidad, que empieza mucho antes de que los organismos desarrollen cerebros y sistemas nerviosos superiores. Enfatizó también que la mente se manifiesta no sólo en organismos individuales, sino también en sistemas sociales y ecosistemas.

Bateson expuso su nuevo concepto de proceso mental por primera vez en Hawai en 1969, en un trabajo que presentó en una conferencia sobre salud mental.[17] Éste era precisamente el mismo año en que Maturana presentaba una formulación distinta de la misma idea básica en la conferencia sobre cognición organizada en Chicago por Heinz von Foerster.[18] De este modo, dos científicos, ambos fuertemente influenciados por la cibernética, habían llegado simultáneamente al mismo concepto revolucionario de mente. No obstante, sus métodos eran muy distintos, al igual que los lenguajes con que describieron su descubrimiento innovador.

Todo el pensamiento de Bateson se desarrollaba en términos de patrones y relaciones. Su objetivo principal, al igual que el de Maturana, era el descubrimiento del patrón de organización común a todas las criaturas vivientes. «¿Qué patrón», se preguntaba, «conecta el cangrejo con la langosta, la orquídea con la primavera y a todos ellos conmigo? ¿Y a mí contigo?»[19]

Bateson creía que para describir la naturaleza adecuadamente, había que tratar de hablar el lenguaje de ésta, el cual -insistía- es un lenguaje de relaciones. Dichas relaciones son la esencia del

mundo vivo, según Bateson. La forma biológica está constituida por relaciones, no por partes, y enfatizaba que es también así como la gente piensa. Consecuentemente, llamó a su libro, en el que discutía su concepto de proceso mental, *Mind and Nature: A Necessary Unity* (Mente y naturaleza: una unidad necesaria).

Bateson tenía una habilidad excepcional para destilar percepciones de la naturaleza mediante una intensa observación. Sin embargo, ésta no era una observación científica ordinaria. Bateson era de algún modo capaz de observar una planta o animal con todo su ser, con empatia y pasión, y cuando hablaba de ella o él, lo describía con amante y minucioso detalle, utilizando lo que él consideraba el lenguaje de la naturaleza para hablar de los principios generales que cosechaba de este contacto directo con el ser vivo. Se emocionaba intensamente con la belleza manifestada en la complejidad de las relaciones pauladas de la naturaleza y la descripción de estos patrones le proporcionaba un gran placer estético.

Bateson desarrolló su criterio de proceso mental intuitivamente desde su atenta observación del mundo vivo. Estaba claro para él que el fenómeno de la mente se hallaba inseparablemente vinculado al fenómeno de la vida. Cuando observaba el mundo vivo, veía su actividad organizadora como esencialmente mental. En sus propias palabras, «la mente es la esencia de estar vivo».[20]

A pesar de su claro reconocimiento de la unidad de mente y vida -o mente y naturaleza, como él diría-, Bateson nunca preguntó: ¿qué es vida? Nunca sintió la necesidad de formular una teoría, ni tan sólo un modelo, de sistemas vivos que ofreciera un marco conceptual para sus criterios de proceso mental. El desarrollo de dicho marco fue precisamente el planteamiento de Maturana.

Por coincidencia -o quizás intuición-, Maturana se debatía simultáneamente con dos cuestiones que parecían conducirle en direcciones opuestas: ¿cuál es la naturaleza de la vida?, y ¿qué es cognición?[21] Eventualmente descubrió que la respuesta a la primera -autopoiesis- le proporcionaba el marco teórico para responder a la segunda. El resultado es una teoría sistémica de cognición desarrollada por Maturana y Varela, llamada en ocasiones la teoría de Santiago.

El tema central de la teoría de Santiago es el mismo que el de la de Bateson: la identificación de la cognición -el proceso de conocer-, con el proceso de vivir.[22] Esto representa una radical expansión del concepto de mente. Según la teoría de Santiago, el

cerebro no es necesario para que exista la mente. Una bacteria o una planta no tienen cerebro, pero tienen mente. Los organismos más simples son capaces de percepción y, por tanto, de cognición. No ven, pero aun así, perciben los cambios en su entorno: diferencias entre luz y oscuridad, frío y calor, concentraciones más altas o más bajas de compuestos químicos, etc.

El nuevo concepto de cognición es pues mucho más amplio que el de pensamiento. Incluye percepción, emoción y acción: todo el proceso vital. En el reino humano, la cognición incluye también lenguaje, pensamiento conceptual y todos los demás atributos de la consciencia humana. El concepto general, no obstante, es mucho más amplio y no incluye necesariamente al pensamiento.

La teoría de Santiago ofrece, bajo mi punto de vista, el primer marco conceptual científico coherente que verdaderamente supera la división cartesiana. Materia y mente ya no aparecen como pertenecientes a dos categorías separadas, sino que son vistas como representantes de dos aspectos meramente diferentes -o dimensiones- del mismo fenómeno de la vida.

Para ilustrar el progreso conceptual que significa esta visión unificada de mente, materia y vida, volvamos a una cuestión que ha confundido a científicos y filósofos durante más de cien años: ¿cuál es la relación entre mente y cerebro? Los neurocientíficos sabían desde el siglo xix que las estructuras cerebrales y las funciones mentales están íntimamente vinculadas, pero la naturaleza exacta de esta relación constituía un misterio. Tan recientemente como en 1994, los editores de una antología titulada *Consciencia en filosofía y neurociencia cognitiva* declaraban abiertamente en su introducción: «Si bien todo el mundo está de acuerdo en que la mente tiene algo que ver con el cerebro, no existe aún un acuerdo general sobre la naturaleza exacta de esta relación.»[23]

En la teoría de Santiago, la relación entre mente y cerebroes simple y clara. La caracterización de la mente hecha por Descartes como «la cosa que piensa» *{res cogitans7es por fin* abandonada. La mente no es ya una cosa, sino un proceso:el proceso de cognición, que se identifica con el proceso de la vida. El cerebro es una estructura específica a través de la cual este proceso opera. La relación entre mente y cerebro es pues una relación entre proceso y estructura.

El cerebro no es, por supuesto, la única estructura a través de la cual opera el proceso de cognición. La entera estructura disipa-

tiva del organismo participa en dicho proceso, con independencia de que el organismo tenga o no un cerebro y un sistema nervioso superior. Más aún, investigaciones recientes indican firmemente que en el organismo humano, el sistema nervioso, el sistema inmunológico y el sistema endocrino -que tradicionalmente eran vistos como sistemas separados- forman en realidad una única red cognitiva.[24]

La nueva síntesis de mente, materia y vida, que exploraremos con gran detalle en las páginas siguientes, conlleva dos unificaciones conceptuales. La interdependencia entre patrón y estructura nos permite integrar dos planteamientos de la comprensión de la vida que han estado separados y han rivalizado a través de la ciencia y la filosofía occidentales. La interdependencia entre proceso y estructura nos permite superar el cisma entre mente y materia que ha obsesionado nuestra era moderna desde Descartes hasta nuestros días. La reunión de ambas unificaciones proporciona las tres dimensiones conceptuales interdependientes para la nueva comprensión científica de la vida.

ESTRUCTURA Y CAMBIO

Desde los inicios de la biología, filósofos y científicos se habían dado cuenta de que las formas vivas, de múltiples y misteriosas maneras, combinan la estabilidad de la estructura con la fluidez del cambio. Como los remolinos, dependen de un flujo constante de materia; como las llamas, transforman los materiales de los que se nutren para mantener su actividad y crecer; pero a diferencia de remolinos y llamas, las estructuras vivas también se desarrollan, se reproducen y evolucionan.

En los años cuarenta, Ludwig von Bertalanffy llamó «sistemas abiertos» a tales estructuras, para enfatizar su dependencia de flujos continuos de energía y recursos. Acuñó el término *fliessgleichgewicht* («balance fluyente») para expresar esta coexistencia de balance y flujo, de estructura y cambio, presente en todas las formas de vida.[1] Subsecuentemente, los ecólogos empezaron a representar ecosistemas en términos de diagramas de flujos, cartografiando los caminos seguidos por materia y energía a través de diversas redes tróficas. Estos estudios establecieron el reciclaje como el principio clave de la ecología. Como sistemas abiertos, todos los organismos de un ecosistema producen residuos, pero lo que es desperdicio para una especie, es alimento para otra, de modo que los residuos son continuamente reciclados y el ecosistema como un todo no produce generalmente desperdicios.

Las plantas verdes juegan un papel crucial en el flujo de energía a través de todos los ciclos ecológicos. Sus raíces absorben agua y sales minerales del suelo y los jugos resultantes ascienden hasta las hojas, donde se combinan con el dióxido de carbono ($C0_2$) del aire para formar azúcares y otros compuestos orgánicos que incluyen a la celulosa, principal elemento estructural de las paredes celulares. En este maravilloso proceso, conocido como fotosíntesis, la energía solar es transformada en energía química y vinculada a las substancias orgánicas, mientras que el oxígeno es liberado a la atmósfera para ser utilizado por otros animales y plantas en su proceso de respiración.

Al combinar el agua y los minerales de abajo con la luz del sol y el $C0_2$ de arriba, las plantas conectan la tierra con el cielo. Tendemos a pensar que las plantas crecen del suelo pero en realidad la mayor parte de su substancia les llega desde el aire. El grueso de la celulosa y de otros compuestos orgánicos producidos mediante la fotosíntesis, consiste en átomos pesados de carbono y oxígeno, que las plantas absorben directamente de la atmósfera en forma de $C0_2$. De este modo, el peso de un tronco proviene casi por completo del aire. Cuando este tronco es quemado en un hogar, el oxígeno y el carbono se combinan de nuevo en CO_2, mientras que en la luz y en el calor desprendidos por el fuego, recuperamos parte de la energía solar que intervino en el proceso de creación del tronco.

La figura 8-1 muestra un ciclo trófico típico. Al ser comidas las plantas por animales que a su vez son comidos por otros animales, los nutrientes de las plantas pasan a través de la red trófica, mientras que la energía es disipada en forma de calor a través de la respiración y en forma de residuo a través de la excreción. Los residuos, así como los animales y plantas muertos, son descompuestos por los llamados organismos de descomposición (insectos y bacterias), que los desintegran en nutrientes básicos, que serán absorbidos de nuevo por plantas verdes. De este modo los nutrientes y otros elementos básicos circulan continuamente por el ecosistema, mientras que la energía es disipada en cada paso. De ahí el dicho de Eugene Odum: «La materia circula, la energía se disipa.»[2] El único desperdicio generado por el ecosistema como un todo es la energía térmica desprendida en la respiración, que es irradiada a la atmósfera y realimentada constantemente por el sol a través de la fotosíntesis.

Nuestra ilustración está, por supuesto, muy simplificada. Los ciclos tróficos reales sólo pueden ser entendidos dentro del contexto de redes alimentarias mucho más complejas, en las que los elementos nutrientes básicos aparecen formando parte de una gran variedad de compuestos químicos. ¡En los años recientes, nuestro conocimiento sobre estas redes de alimento ha sido expandido y refinado notablemente por la teoría Gaia, que demuestra la compleja interacción entre sistemas vivos y no vivos a tra-

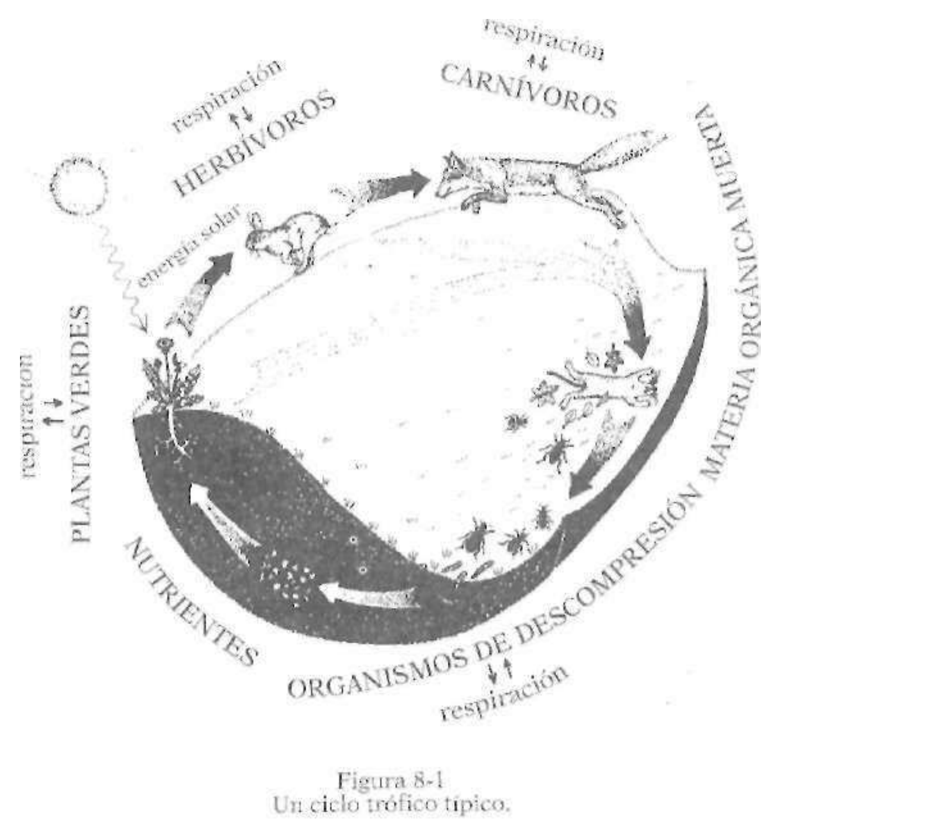


Figura 8-1
Un ciclo trófico típico.

vés de la biosfera: plantas y rocas, animales y gases atmosféricos, microorganismos y océanos.

Además, el flujo de nutrientes a través de los organismos de un ecosistema no es siempre homogéneo y uniforme, sino que procede a menudo en pulsaciones, saltos y raudales. En palabras de Prigogine y Stengers: «El flujo de energía que cruza un organismo se asemeja de algún modo al flujo de un río que se mueve por lo general armonioosamente pero que de vez en cuando se precipita por una cascada liberando parte de su energía.»[3]

La comprensión de las estructuras como sistemas abiertos proporcionó una importante nueva perspectiva, pero no solucionó el rompecabezas de la coexistencia de estructura v cambio, de orde y disipación hasta que Ilya Prigogine formuló su teoría de estructuras disipativas.[4] Del mismo modo que Bertalanffy había combinado los conceptos de flujo y equilibrio para describir a los

sistemas abiertos, Prigogine combinó «disipativa» y «estructura» para expresar las dos tendencias, aparentemente contradictorias, que coexisten en todo sistema viviente. No obstante, el concepto de Prigogine de estructura disipativa va mucho más allá del de sistema abierto, puesto que incluye la idea de puntos de inestabilidad en los que pueden surgir nuevas estructuras y formas de orden.

La teoría de Prigogine interconecta las principales características de las formas vivas en un marco conceptual y matemático coherente que implica una reconceptualización radical de muchas de las ideas fundamentales asociadas con la estructura: un cambio de percepción de estabilidad a inestabilidad, de orden a desorden, de equilibrio a desequilibrio, de ser a devenir. En el centro de la visión de Prigogine reside la coexistencia entre estructura y cambio, «quietud y movimiento», como él mismo explica elocuentemente con una referencia a la escultura antigua:

> Cada gran período de la ciencia ha conducido a una determinada metáfora de la naturaleza. Para la ciencia clásica era el reloj, para la ciencia del siglo xix -el periodo de la Revolución industrial- fue un motor deteniéndose. ¿Cuál será para nosotros? Lo que tenemos en mente puede quizás ser expresada en releí encía a la escultura, desde el arte indio o precolombino hasta nuestros días. En algunas de las más bellas manifestaciones de la escultura, ya sea el Shiva danzante o los templos en miniatura de Guerrero, aparece muy claramente la búsqueda de una unión entre quietud y movimiento, tiempo detenido y tiempo fluyente. Creemos que esta confrontación aportará a nuestro período su singularidad.[5]

NO-EQUILIBRIO Y NO-LINEALIDAD

La clave para entender |as estructuras disipativas es comprender que se mantienen en un estado estable lejos del equilibrio. Esta situación es tan distinta de los fenómenos descritos por la ciencia clásica que encontramos dificultades con el lenguaje convencional. Las definiciones de diccionario de la palabra «estable» incluyen «fijado», «no fluctuante» e «invariable», todas ellas inadecuadas para la descripción de las estructuras disipativas. Un organismo vivo se caracteriza por un flujo y un cambio continuos en su metabolismo, comprendiendo miles de reacciones químicas. El equilibrio químico y térmico se da únicamente cuando es-

tos procesos se detienen. En otras palabras, un organismo en equilibrio es un organismo muerto. Los organismos vivos se mantienen constantemente en un estado alejado del equilibrio, en el estado de vida. Siendo muy distinto del equilibrio, este estado es sin embargo estable a lo largo de períodos prolongados de tiempo, lo que significa que, como en el remolino, se mantiene la misma estructura general a pesar del incesante flujo y cambio de componentes.

Prigogine comprendió que la termodinámica clásica -la primera ciencia de la complejidad- resultaba inadecuada para la descripción de sistemas alejados del equilibrio, debido a la naturaleza lineal de su estructura matemática. Cerca del equilibrio -en el ámbito de la termodinámica clásica-, hay procesos fluyentes denominados «flujos», pero son débiles. El sistema evolucionará siempre hacia un estado estacionario en el que la generación de entropía (o desorden) sea lo más pequeña posible. En otras palabras, el sistema minimizará sus flujos, manteniéndose tan próximo al estado de equilibrio como le sea posible. En este ámbito limitado, los procesos fluctuantcs pueden ser descritos con ecuaciones lineales.

Más lejos del equilibrio los flujos son más fuertes, la producción de entropía aumenta y el sistema ya no tiende al equilibrio. Bien al contrario, podrá encontrarse con inestabilidades que le conduzcan a nuevas formas de orden que alejarán al sistema más y más del estado de equilibrio. En otras palabras, lejos del equilibrio las estructuras disipativas pueden desarrollarse hacia formas de complejidad creciente.

Prigogine enfatiza que las características de una estructura disipativa no pueden deducirse de las propiedades de sus partes, sino que son consecuencia de su «organización supramolecular».[11] Aparecen correlaciones de largo alcance en el mismo punto de transición de equilibrio a no-equilibrio, y a partir de este punto, el sistema se comporta como un todo.

Lejos del equilibrio, los procesos fluyentes del sistema están vinculados a través de múltiples bucles de retroalimentación y las ecuaciones matemáticas correspondientes son no-lineales. Cuanto más alejado del equilibrio está un sistema, mayor es su complejidad y más alto el grado de no-linealidad de las ecuaciones matemáticas que lo describen.

Comprendiendo el vínculo crucial entre no-equilibrio y no-linealidad, Prigogine y sus colaboradores crearon una dinámica no-lineal para los sistemas alejados del equilibrio, utilizando las

técnicas de la teoría de los sistemas dinámicos -las nuevas matemáticas de la complejidad-, que acababa de ser desarrollada.[7] Las ecuaciones lineales de la termodinámica clásica -señaló Prigogine- pueden ser analizadas en términos de atractores puntuales. Cualquiera que sea el estado inicial del sistema, será «atraído» hacia un estado estacionario de mínima entropía lo más cercano posible al equilibrio y su comportamiento será completamente predecible. Como explica Prigogine, los sistemas en el ámbito lineal tienden a «olvidar sus condiciones iniciales».[8]

Fuera de la región lineal, la situación es espectacularmente distinta. Las ecuaciones no-lineales tienen por regla general más de una solución; a mayor no-linealidad, mayor número de soluciones. Ello significa que en cualquier momento pueden surgir nuevas situaciones. Matemáticamente hablando, en tales momentos el sistema se encuentra con un punto de bifurcación en el que puede desviarse hacia un estado completamente nuevo. Veremos más adelante cómo el comportamiento del sistema en el punto de bifurcación (es decir, cuál de los caminos que se le presentan tomará) depende del historial previo del sistema. En el ámbito no-lineal, las condiciones iniciales ya no son «olvidadas».

Además, la teoría de Prigogine demuestra que el comportamiento de una estructura disipativa alejada del equilibrio no sigue ninguna ley universal, sino que es exclusivo del sistema específico. Cerca del equilibrio, podemos encontrar fenómenos repetitivos y leyes universales. A medida que nos alejamos de él, nos desplazamos de lo universal a lo único, hacia la riqueza y la variedad. Ésta, sin duda, es una característica bien conocida de la vida.

La existencia de bifurcaciones en las que el sistema puede tomar una entre varias direcciones, implica que la indeterminación es otra característica de la teoría de Prigogine. Llegado al punto de bifurcación, el sistema puede «escoger» -metafóricamente hablando- entre varios caminos o estados posibles. La «elección», que no puede en ningún caso ser pronosticada, dependerá de los antecedentes del sistema y dé vánás'condiciones externas. Existe pues un elemento irreductible de aleatoriedad en cada punto de bifurcación.

Esta indeterminación en las bifurcaciones es una de las dos clases de impredecibilidad de la teoría de las estructuras disipativas. La otra, presente también en la teoría del caos, se debe a la naturaleza altamente no-lineal de las ecuaciones, y se da incluso en ausencia de puntos de bifurcación. Debido a la reiteración de

bucles de retroalimentación -o matemáticamente, repetidas iteraciones-, el más mínimo error en los cálculos, causado por la necesidad práctica de redondear cifras a algún nivel de decimales, añadirá inevitablemente suficiente incertidumbre para hacer imposible toda predicción.[9]

Esta indeterminación en los puntos de bifurcación y la impredecibilidad «tipo caos» debida a las repetidas iteraciones, implican que el comportamiento de una estructura disipativa sólo puede ser pronosticado para un corto lapso de tiempo. Tras éste, la trayectoria del sistema nos elude. Así, la teoría de Prigogine, al igual que la teoría cuántica y la teoría del caos, nos recuerda una vez más que el conocimiento científico no puede ofrecernos más que «una limitada ventana al universo».[10]

EL VECTOR TIEMPO

Según Prigogine, el reconocimiento de la indeterminación como característica clave de los fenómenos naturales es parte de una profunda reconceptualización de la ciencia. Un aspecto íntimamente unido a este cambio conceptual afecta a las nociones científicas de irreversibilidad y tiempo.

En el paradigma mecanicista de la ciencia newtoniana, el mundo era visto como completamente causal y determinado. Todo lo que acontecía tenía una causa definida y daba lugar a un electo determinado. El futuro de cualquier parte del sistema, al igual que su pasado, podía ser en principio calculado con absoluta certeza si su estado en un momento dado era conocido con todo detalle. Este determinismo riguroso halló su más clara expresión en las célebres palabras de Pierre Simón Laplace:

> Un intelecto que en un momento dado conociese todas las fuerzas actuantes en la naturaleza y la posición de todas las cosas de que el mundo consiste -suponiendo que el mencionado intelecto fuese suficientemente vasto para someter todos estos datos a análisis-, abarcaría en la misma fórmula el movimiento de los mayores cuerpos del universo y los de los más pequeños átomos; nada sería incierto para él y el futuro, al igual que el pasado, estaría presente ante sus ojos.>'

+En este determinismo laplaciano, no hay diferencia entre pasado y futuro. Ambos se hallan implícitos en el estado presente

del mundo y en las ecuaciones newtonianas del movimiento. Todos los procesos son estrictamente reversibles. Tanto futuro como pasado son intercambiables, no hay lugar para la historia, la novedad ni la creación.

Los efectos irreversibles (como la fricción) se conocían en la física clásica newtoniana, pero eran despreciados sistemáticamente. En el siglo xix, esta situación cambió drásticamente. Con la invención de los motores térmicos, la irreversibilidad de la disipación de energía en fricción, viscosidad (la resistencia de un líquido a fluir) y pérdidas térmicas se convirtió en el tema central de la nueva ciencia de la termodinámica, que introdujo la idea de un «vector tiempo». De repente, geólogos, biólogos, filósofos y poetas empezaron a pensar en cambio, crecimiento, desarrollo y evolución. El pensamiento del siglo xix quedó profundamente preocupado por la naturaleza del devenir.

En termodinámica clásica, la irreversibilidad, aun siendo una característica importante, se asocia siempre con pérdidas de energía y desperdicio. Prigogine introdujo un cambio fundamental a esta visión en su teoría de estructuras disipativas demostrando que, en los sistemas vivos que operan lejos del equilibrio, los procesos irreversibles juegan un papel indispensable.

Las reacciones químicas -los procesos básicos para la vida- son el prototipo de proceso irreversible. En el mundo newtoniano, no cabían la química ni la vida. La teoría de Prigogine demuestra cómo un determinado tipo de procesos químicos -los bucles catalíticos esenciales para los organismos vivos-[12] conduce a inestabilidades mediante la reiterada retroalimentación autoamplificadora y cómo emergen nuevas estructuras de creciente complejidad en los sucesivos puntos de bifurcación. «La irreversibilidad», decía Prigogine, «es el mecanismo que extrae orden del caos.»[13]

Así pues, el cambio conceptual científico abogado por Prigogine es un cambio de procesos reversibles y deterministas a indeterminados e irreversibles. Puesto que los procesos irreversibles son esenciales para la química y la vida, mientras que la permutabilidad entre futuro y pasado es parte integrante de la física, parece que la reconceptualización de Prigogine debe contemplarse, en el contexto más amplio discutido al principio de este libro en relación con la ecología profunda, como parte del cambio de paradigma de la física a las ciencias de la vida.[14]

El vector tiempo introducido en termodinámica clásica no apuntaba hacia un creciente orden, sino en dirección contraria. Según la segunda ley de termodinámica, hay en los fenómenos físicos una tendencia del orden al desorden, hacia una creciente entropía.[15] Uno de los logros capitales de Prigogine fue la resolución de la paradoja de las dos visiones contradictorias de la evolución en física y en biología: la una como un motor abocado a la detención final, la otra como un mundo vivo desplegándose hacia un orden y complejidad crecientes. En palabras del mismo Prigogine: «Existe [una] pregunta que nos ha perseguido durante más de un siglo: ¿qué significado tiene la evolución de un ser vivo en el mundo descrito por la termodinámica, un mundo en desorden creciente?»[16]

En la teoría de Prigogine, la segunda ley de termodinámica sigue siendo válida, pero la relación entre entropía y desorden se contempla bajo una nueva luz. Para comprender esta nueva percepción, resulta útil recordarlas definiciones clásicas de entropía y orden. El concepto de entropía fue introducido en el siglo xix por el físico y matemático alemán Rudolf Clausius para medir la disipación de energía en forma de calor y fricción. Clausius definía la entropía generada en un proceso térmico como la energía disipada, dividida por la temperatura a la que ocurre el proceso. Según la segunda ley, la entropía sigue aumentando a medida que progresa el fenómeno térmico, la energía disipada no puede ser recuperada, y es esta dirección hacia una creciente entropía la que define el vector tiempo.

Si bien la disipación de energía en calor y fricción es comúnmente bien conocida, tan pronto como se formuló la segunda ley surgió una inquietante cuestión: ¿qué es exactamente lo que causa esta irreversibilidad? En física newtoniana, los efectos de la fricción habían sido generalmente despreciados al no ser considerados importantes. No obstante, estos efectos *pueden* ser tenidos en cuenta dentro del marco newtoniano. En principio -argumentaban los científicos-, deberíamos poder usar las leyes newtonianas del movimiento para describir la disipación de energía al nivel de moléculas, en términos de cascadas de colisiones. Cada una de estas colisiones es en sí un acontecimiento reversible, de modo que debería ser perfectamente posible revertir todo el proceso. La disipación de energía -irreversible a nivel macroscópico según la segunda ley y la experiencia común- parece pues estar compuesta

de acontecimientos completamente reversibles a nivel microscópico. Así pues, ¿por dónde se cuela la irreversibilidad?

El misterio fue resuelto a principios de siglo por el físico austríaco Ludwig Boltzmann, uno de los grandes teóricos de la termodinámica clásica, quien otorgó un nuevo significado al concepto de entropía y estableció el vínculo entre entropía y orden. Siguiendo la línea de razonamiento iniciada por James Clerk Maxwell, fundador de la mecánica estadística,[17] Boltzmann diseñó un ingenioso experimento mental para examinar el concepto de entropía a nivel molecular.[18]

Supongamos que tenemos una caja -razonaba Boltzmann- dividida en dos compartimentos iguales por una partición central imaginaria y ocho moléculas identificables, numeradas del uno al ocho como bolas de billar. ¿De cuántas formas podemos distribuir estas partículas en la caja, de modo que unas queden en el compartimento de la izquierda y otras en el de la derecha?

Primero pongamos todas las partículas en el lado izquierdo. Hay una única manera de hacerlo. En cambio, si ponemos siete a la izquierda y una a la derecha, dado que la partícula de la derecha puede ser cualquiera de las ocho, tendremos ocho posibilidades distintas, cada una de las cuales contará como una distribución distinta al ser las partículas diferenciables entre sí.

De forma parecida, hay veintiocho distribuciones distintas para seis partículas en la izquierda y dos en la derecha.

Puede deducirse fácilmente una fórmula general para todas estas permutaciones,[19] que demuestra que el número de posibilidades aumenta a medida que disminuye la diferencia entre las partículas de ambos lados, alcanzando un máximo de setenta combinaciones para un número igual de moléculas, cuatro a cada lado (ver figura 8-2).

'Boltzmann denominó «complexiones» a las distintas combinaciones y las asoció con el concepto de orden: a menor número de complexiones, más elevado el nivel de orden. Así pues, en nuestro ejemplo, el primer estadio con todas las partículas agrupadas en un mismo lado, presenta el máximo nivel de orden, mientras que la distribución simétrica, con cuatro partículas en cada lado, representa el máximo nivel de desorden.

Es importante señalar que el concepto de orden introducido por Boltzmann es un concepto t*ermodinámico,* en el que las moléculas están en constante movimiento. En nuestro ejemplo, la partición de la caja es puramente imaginaria y las moléculas en movimiento aleatorio la cruzarán constantemente. A lo largo del

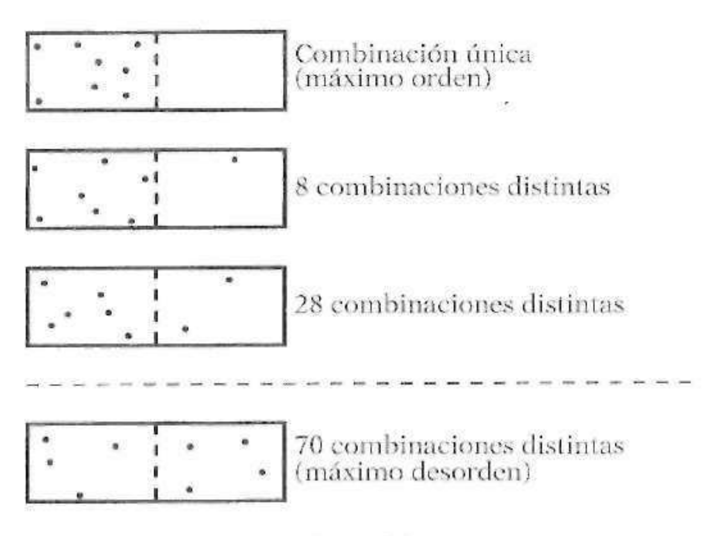


Figura 8-2
El experimento mental de Boltzmann.

tiempo, el gas alcanzará distintos estados -es decir, con distinto número de moléculas en ambos lados de la caja- y el número de complexiones para cada uno de estos estados estará relacionado con su nivel de orden. Esta definición de orden en termodinámica es muy distinta de los rígidos conceptos de orden y equilibrio de la mecánica newtoniana.

Tomemos ahora otro ejemplo del concepto de orden de Boltzmann, más próximo a nuestra experiencia cotidiana. Supongamos que llenamos un saco con dos clases de arena, la mitad inferior con arena negra y la mitad superior con arena blanca. Éste sería un estado de elevado nivel de orden, con una sola complexión. Agitemos luego el saco para mezclar los granos de arena. A medida que la arena negra se mezcla más y más con la arena blanca, el número de complexiones posibles aumenta y con él, el nivel de desorden hasta llegar a una mezcla igual, en que la arena tiene un color gris uniforme y el nivel de desorden es máximo.

Con la ayuda de su definición de orden, Boltzmann podía ya analizar el comportamiento de las moléculas de un gas. Utilizando los métodos estadísticos explorados por Maxwell para describir el movimiento molecular aleatorio, Boltzmann se percató de que el número de posibles complexiones para cada estado determina la medición de la probabilidad del gas para estar en dicho estado. Así es como se define la probabilidad; cuantas más complexiones se

den para un determinado estado, más probable será que ocurra dicho estado en un gas con moléculas en movimiento aleatorio.

De este modo, el número de posibles complexiones para una determinada disposición de las moléculas, da la medición tanto del grado de orden de dicho estado como de la probabilidad de su existencia. Cuanto más alto sea el número de complexiones, mayores serán el desorden y la probabilidad de que el gas esté en aquel estado. En consecuencia, Boltzmann concluyó que el movimiento de orden a desorden es un movimiento de estado improbable a estado probable. Al identificar entropía y desorden con número de complexiones, introdujo una definición de entropía en términos de probabilidades.

Según Boltzmann, no existe ninguna ley en física que impida el movimiento desde el desorden al orden, pero con un movimiento aleatorio de moléculas, semejante dirección parece altamente improbable. Cuanto mayor sea el número de moléculas, más alta será la probabilidad de movimiento desde el orden hacia el desorden. Dado el enorme número de partículas que constituyen un gas, esta probabilidad, a efectos prácticos, se convierte en certeza. Al agitar un saco con arena blanca y negra, podríamos llegar a observar cómo se separan, casi milagrosamente, los granos de cada color hasta crear el altamente ordenado estado de separación total de colores, pero quizás deberíamos estar agitando el saco durante varios millones de años para que ocurriese semejante acontecimiento.

En el lenguaje de Boltzmann, la segunda ley de termodinámica significa que todo sistema cerrado tiende al estado de máxima probabilidad, que se corresponde con el estado de máximo desorden. Matemáticamente, este estado puede definirse como el estado atractor de equilibrio térmico. Una vez alcanzado el equilibrio, el sistema no se alejará de él. Ocasionalmente el movimiento molecular aleatorio dará lugar a distintos estados, pero éstos serán próximos al equilibrio y sólo existirán durante breves períodos de tiempo. En otras palabras, el sistema meramente fluctuará alrededor del estado de equilibrio térmico.

La termodinámica clásica resulta pues inadecuada para la descripción de los fenómenos en equilibrio o cerca de él. La teoría de Prigogine de las estructuras disipativas, en cambio, se puede aplicar a los fenómenos termodinámicos alejados del equilibrio, en los que las moléculas no se hallan en estado de movimiento aleatorio, sino entrelazadas a través de múltiples bucles de retroalimentación, descritos por ecuaciones no-lineales. Dichas ecuacio-

nes ya no están dominadas por atractores puntuales, lo que significa que el sistema no tiende ya al equilibrio. Una estructura disipativa se mantiene alejada del equilibrio y puede incluso alejarse más y más mediante una serie de bifurcaciones.

En los puntos de bifurcación, pueden surgir espontáneamente estados de orden (en el sentido otorgado por Boltzmann a este término) superior lo que, no obstante, no contradice la segunda ley de la termodinámica. La entropía total del sistema sigue aumentando, pero este aumento en entropía no significa un aumento uniforme en desorden. En el mundo vivo, orden y desorden son siempre creados simultáneamente.

Según Prigogine, las estructuras disipativas son islas de orden en un mar de desorden, manteniendo e incluso aumentando su orden a expensas del creciente desorden de su entorno. Por ejemplo, los organismos vivos toman estructuras ordenadas (alimentos) de su entorno, las utilizan como recursos para sus procesos metabólicos y disipan estructuras de orden inferior (desechos) hacia el entorno. De este modo, el orden «flota en el desorden», en palabras de Prigogine, mientras que la entropía total sigue aumentando de acuerdo con la segunda ley.[20]

Esta nueva percepción de orden y desorden representa una inversión de las visiones científicas tradicionales. En la perspectiva clásica, para la que la física es la principal fuente de conceptos y metáforas, se asocia orden con equilibrio -como, por ejemplo, en cristales y otras estructuras estáticas-, mientras que el desorden se identifica con situaciones de no-equilibrio tales como turbulencias. En la nueva ciencia de la complejidad -que se inspira en la trama de la vida-, aprendemos que el no-equilibrio es una fuente de orden. Los flujos turbulentos de aire y agua, si bien aparentemente caóticos, están en realidad altamente organizados, exhibiendo complejos patrones de vórtices dividiéndose y subclividiéndose una y otra vez a escalas cada vez menores. En los sistemas vivos, el orden emergente del no-equilibrio resulta mucho más evidente, manifestándose en la riqueza, diversidad y belleza del mundo que nos rodea. A través del mundo viviente, el caos es transformado en orden.

PUNTOS DE INESTABILIDAD

Los puntos de inestabilidad en los que suceden dramáticos e impredecibles acontecimientos, donde el orden emerge espontáneamente y se despliega la complejidad, son quizás el aspecto más intrigante y fascinante de la teoría de las estructuras disipativas. Con anterioridad a Prigogine, el único tipo de inestabilidad estudiado en detalle era la turbulencia causada por la fricción interna de gases o líquidos fluyentes.[21] Leonardo da Vinci realizó múltiples y cuidadosos estudios sobre flujos acuáticos turbulentos y en el siglo xix, se efectuó una serie de experimentos que demostraron que cualquier flujo de agua o aire se convertirá en turbulento si se da la suficiente velocidad; en otras palabras, a una «distancia» suficientemente grande del equilibrio o estado de reposo.

Los estudios de Prigogine demostraron que esto no es cierto para las reacciones químicas. Las inestabilidades químicas no aparecerán automáticamente lejos del equilibrio. Requieren la presencia de bucles catalíticos que conducen al sistema al punto de inestabilidad a través de una reiterada retroalimentación autoamplificadora.[22] Estos procesos combinan dos fenómenos distintos: reacciones químicas y difusión (el flujo físico de moléculas debido a diferencias de concentración). Consecuentemente, las ecuaciones no-lineales que las describen reciben el nombre de «ecuaciones de reacción-difusión». Constituyen la esencia de la teoría de Prigogine, propiciando un sorprendente abanico de comportamientos.[2,1]

El biólogo británico Brian Goodwin ha aplicado las técnicas matemáticas de Prigogine de un modo sumamente ingenioso para representar las etapas del desarrollo de un alga monocelular muy especial.[24] Preparando ecuaciones diferenciales que interrelacionan los patrones de la concentración de calcio en el fluido celular del alga con las propiedades mecánicas de sus paredes, Goodwin y sus colegas pudieron identificar bucles de retroalimentación en un proceso de autoorganización, en el que emergen estructuras de orden creciente en sucesivos puntos de bifurcación.

'Un punto de bifurcación constituye un umbral de estabilidad en el que la estructura disipativa puede o bien derrumbarse, o bien trascender hacia uno o varios nuevos estados de orden. Lo que suceda exactamente en este punto crítico dependerá de la historia previa del sistema. Según el camino que haya tomado para llegar al punto de inestabilidad, seguirá uno u otro de los ramales accesibles tras éste.

Este papel importante de la historia de una estructura disipativa en los puntos críticos para su desarrollo posterior, que Prigogine ha observado incluso en simples oscilaciones químicas, pa-

rece ser el origen físico de la conexión entre historia y estructura característico de todos los sistemas vivos. La estructura viva, como veremos, es siempre un informe de su desarrollo previo.[25]

En el punto de bifurcación, la estructura disipativa muestra también una extraordinaria sensibilidad a pequeñas fluctuaciones de su entorno. Una ligera fluctuación aleatoria, llamada a menudo «ruido», puede influir en la elección de un camino. Dado que lodos los sistemas vivos existen en el seno de medios en continua fluctuación y puesto que nos resulta imposible saber qué fluctuación se producirá en el punto de bifurcación, justo en el momento «oportuno», nunca podremos predecir el camino futuro de un sistema.

De este modo, toda descripción determinista se desmorona cuando una estructura disipativa cruza un punto de bifurcación. Minúsculas fluctuaciones en el entorno conducirán a la elección de la rama que seguirá y puesto que, de algún modo, son estas fluctuaciones aleatorias las que conducen a la aparición de nuevas formas de orden, Prigogine acuñó la frase «orden a través de las fluctuaciones» para describir la situación.

Las ecuaciones de la teoría de Prigogine son ecuaciones deterministas. Gobiernan el comportamiento del sistema entre los puntos de bifurcación, mientras que las fluctuaciones aleatorias son decisivas en estos puntos de inestabilidad. De este modo, «los procesos en condiciones lejos del equilibrio, corresponden a una delicada interacción entre oportunidad y necesidad, entre fluctuaciones y leyes deterministas».[26]

UN NUEVO DIÁLOGO CON LA NATURALEZA

El cambio conceptual implícito en la teoría de Prigogine comprende varias ideas íntimamente interrelacionadas. La descripción de *estructuras disipativas* que existen *lejos del equilibrio* requiere un formalismo matemático *no-lineal,* capaz de representar múltiples bucles de retroalimentación interrelacionados. En los organismos vivos, hay bucles catalíticos (es decir, procesos químicos no-lineales, *irreversibles)* que conducen a *inestabilidades* a través de la reiterada retroalimentación autoamplificadora. Cuando una estructura disipativa alcanza semejante punto de inestabilidad denominada *punto de bifurcación,* entra un elemento de *indeterminación* en la teoría. En el punto de bifurcación, el comportamiento del sistema es totalmente *impredecible.* En particular,

pueden surgir espontáneamente nuevas estructuras de *orden y* complejidad más elevadas. De este modo, la autoorganización, la emergencia espontánea de orden, resulta de los efectos combinados del no-equilibrio, la irreversibilidad, los bucles de retroalimentación y la inestabilidad.

La naturaleza radical de la visión de Prigogine se pone de manifiesto en el hecho de que estas ideas fundamentales eran raramente formuladas en la ciencia tradicional y a menudo recibían connotaciones negativas. Ello resulta evidente en el mismo lenguaje utilizado para expresarlas. No-equilibrio, no-linealidad, inestabilidad, indeterminación, etc., son todas ellas formulaciones negativas. Prigogine cree que el cambio conceptual implicado por su teoría de las estructuras disipativas no sólo es crucial para la comprensión por los científicos de la naturaleza de la vida, sino que nos ayuda también a integrarnos más plenamente con la naturaleza misma.

Muchas de las características clave de las estructuras disipativas -la sensibilidad a los pequeños cambios en el medio, la relevancia del historial previo en los puntos críticos de elección, la incertidumbre e impredecibilidad de futuro- son nuevos conceptos revolucionarios desde el punto de vista de la ciencia clásica, pero son parte integrante de la experiencia humana. Esto es algo que, dado que las estructuras disipativas son las estructuras básicas de todos los sistemas vivientes -incluyendo los seres humanos-, quizás no debería sorprendernos.

Lejos de ser una máquina, la naturaleza en general se asemeja mucho más a la condición humana: impredecible, sensible al mundo exterior, influenciable por pequeñas fluctuaciones. Consecuentemente, el modo apropiado de acercarse a la naturaleza para aprender de su complejidad y belleza, no es a través de la dominación y el control, sino mediante el respeto, la cooperación y el diálogo. De hecho, Ilya Prigogine e Isabelle Stengers dieron a su popular libro *Orderout of Chaos* (Orden fuera del caos), el subtítulo «El nuevo diálogo del hombre con la naturaleza».

En el mundo determinista de Newton no hay historia ni creatividad. En el mundo viviente de las estructuras disipativas, la historia juega un papel importante, el futuro es incierto y esta incertidumbre está en el corazón de la creatividad. «Hoy», reflexiona Prigogine, «el mundo que percibimos fuera y el que vemos dentro, convergen. Esta convergencia de dos mundos es quizás uno de los acontecimientos culturales más importantes de nuestro tiempo.»[27]

AUTÓMATAS CELULARES

Cuando Ilya Prigogine desarrolló su teoría de las estructuras disipativas, buscó ejemplos simples que pudiesen ser descritos matemáticamente. Los halló en los bucles catalíticos de las oscilaciones químicas, conocidos también como «relojes catalíticos».[1] Éstos no son sistemas vivos, pero los bucles catalíticos idénticos son la pieza central del metabolismo de la célula, el sistema vivo más simple conocido. Por tanto, el modelo de Prigogine nos permite comprender las características estructurales esenciales de las células, en términos de estructuras disipativas.

Humberto Maturana y Francisco Varela siguieron una estrategia similar cuando desarrollaron su teoría de la autopoiesis, el patrón de organización de los sistemas vivos.[2] Se preguntaron: ¿cuál es la corporeización más sencilla de una red autopoiésica que puede ser descrita matemáticamente? Como Prigogine, encontraron que incluso la más simple célula resultaba demasiado compleja para una representación matemática. Por otro lado, también se dieron cuenta de que, puesto que el patrón de autopoiesis es la característica definitoria de un sistema vivo, no existe en la naturaleza sistema autopoiésico más simple que una célula. Así pues, en lugar de buscar un sistema autopoiésico natural adecuado, decidieron simular uno informáticamente.

Su enfoque fue análogo al de James Lovelock para su modelo del Mundo de las Margaritas, diseñado varios años antes.[3] Pero donde Lovelock buscaba la simulación matemática más sencilla para un planeta dotado de una biosfera capaz de regular su temperatura, Maturana y Varela buscaron la simulación más simple de una red de procesos celulares, en la que la función de cada componente fuese ayudar a producir o transformar otros componentes de la red. Al igual que en la célula, esta red autopoiésica debería crear su propio límite, que participaría activamente en los procesos de la red, definiendo al mismo tiempo su extensión.

Para hallar una técnica matemática adecuada a esta tarea, Francisco Varela examinó los modelos matemáticos de redes autoorganizadoras desarrollados en cibernética. Las redes binarias propuestas por McCulloch y Pitts en los años cuarenta no ofrecían suficiente complejidad para simular una red autopoiésica,[4] pero los modelos subsiguientes de redes, conocidos como «autómatas celulares», demostraron ofrecer las técnicas idóneas.

Un autómata celular es una cuadrícula rectangular de espacios cuadrados regulares o «células», parecida a un tablero de ajedrez. Cada célula puede lomar un número diferente de valores y tiene un determinado número de células vecinas que pueden influir sobre este hecho. El patrón o «estado» de toda la cuadrícula cambia en pequeños pasos según un conjunto de «reglas de transición» que se aplican simultáneamente a cada célula. Los autómatas celulares se presumen completamente deterministas, si bien, como veremos, pueden ser introducidos fácilmente en las reglas elementos aleatorios.

Estos modelos matemáticos reciben el nombre de «autómatas» porque fueron inventados originariamente por John von Neumann para construir máquinas autorreplicantes. Si bien tales máquinas nunca llegaron a ser construidas, Von Neumann demostró de modo abstracto y elegante que ello era posible.[5] Desde entonces, los autómatas celulares se han usado extensamente, tanto para representar sistemas naturales, como para diseñar un gran número de juegos matemáticos.[6] Quizás el más conocido sea el llamado «Vida», en el que cada célula puede tener uno de entre dos valores -digamos «blanco» y «negro»- y la secuencia de estados es determinada por tres sencillas reglas denominadas «nacimiento», «muerte» y «supervivencia».[7] El juego puede producir una sorprendente variedad de patrones. Algunos se «mueven» mientras que otros permanecen estables y otros oscilan o se comportan de modos más complejos.[8]

Mientras que los autómatas celulares eran utilizados por matemáticos profesionales y aficionados para el diseño de numerosos juegos, eran también estudiados extensivamente como herramientas matemáticas para representaciones científicas. Debido a su estructura en red y a su capacidad para dar cabida a gran número de discretas variables, estas formas matemáticas fueron pronto reconocidas como una apasionante alternativa a las ecua-

ciones diferenciales para la representación de sistemas complejos.[9] En cierto sentido, los dos planteamientos -ecuaciones diferenciales y autómatas celulares- pueden ser contemplados como los distintos marcos conceptuales correspondientes a las dos dimensiones conceptuales -estructura y patrón- de la teoría de los sistemas vivos.

SIMULANDO REDES AUTOPOIÉSICAS

A principios de los años setenta, Francisco Varela se percató de que las secuencias paso a paso de los autómatas celulares, que resultan idóneas para simulaciones por ordenador, le ofrecían una potente herramienta para la simulación de redes autopoiésicas. Efectivamente, en 1974 Varela consiguió construir la simulación inlormática adecuada, junto con Maturana y el científico informático Ricardo Uribe.[10] Su autómata celular consiste en una cuadrícula en La que un «catalizador» y dos clases de elementos se mueven aleatoriamente e interactúan unos con otros, de tal mudo que pueden ser producidos más elementos de las dos clases, otros pueden desaparecer y algunos pueden unirse para formar cadenas.

En las impresiones por ordenador de la cuadrícula, el catalizador es señalado con una e s t r e l l a . La primera clase de elemento, presente en gran número, se denomina un «elemento de substrato» y se señala con un círculo (0); la segunda clase se denomina un «vínculo» y se representa por un círculo dentro de un cuadrado (El). Hay tres clases distintas de interacciones y transformaciones. Dos elementos de substrato pueden unirse en presencia del catalizador para producir un vínculo; varios vínculos pueden «ligarse» -es decir, mantenerse juntos- para formar una cadena y cualquier vínculo, ya sea libre o formando paite de una cadena, puede desintegrarse de nuevo en dos elementos de substrato. Evenlualmente, una cadena puede cerrarse sobre sí misma.

Las tres interacciones se definen simbólicamente como sigue:

1. Producción: ★ + 0 + 0 → ★ + [0]
2. Ligado: [0] + [0] → [0]-[0]
[0]-[0] + [0] → [0]-[0]-[0]
etc.
3. Desintegración: [0] → 0 + 0

Las prescripciones matemáticas exactas (los llamados algoritmos) de cuándo y cómo estos procesos deben producirse, son bastante complicadas. Consisten en numerosas reglas para los movimientos de varios elementos y sus interacciones mutuas.[1] Por ejemplo, las reglas de movimiento comprenden las siguientes:

- Los elementos de substrato sólo pueden desplazarse para ocupar espacios disponibles («agujeros») de la cuadrícula, mientras que los catalizadores y los vínculos pueden desplazar a los elementos de substrato, empujándolos a agujeros adyacentes. El catalizador puede desplazar del mismo modo a un vínculo libre.
- El catalizador y los vínculos pueden también intercambiar espacios con los elementos de substrato, pudiendo así circular libremente por éste.
- Los elementos de substrato, pero no los catalizadores y los vínculos, pueden pasar a través de una cadena para ocupar un espacio libre detrás de ésta. (Esto simula la semipermeabilidad de la membrana celular.)
- Los vínculos ligados en una cadena son inamovibles.

Dentro de estas reglas, el movimiento real de los elementos y muchos detalles de sus interacciones mutuas -producción, ligado y desintegración-, son escogidos aleatoriamente.[12] Cuando la simulación se desarrolla en un ordenador, se genera una red de interacciones que incluye muchas elecciones aleatorias y, por consiguiente, puede general" múltiples secuencias distintas. Los autores pudieron demostrar que algunas de estas secuencias generan patrones autopoiésicos estables.

La figura 9-1 reproduce un ejemplo de una de estas secuencias presentada en siete pasos, extraído de su publicación.

En el estado inicial (paso I), un espacio de la cuadrícula está ocupado por el catalizador y todos los demás por elementos de substrato. En el paso siguiente, se han producido varios vínculos y, consecuentemente, existen varios huecos en la cuadrícula. En el paso 3 se han producido más vínculos y algunos de ellos se han ligado. La producción de vínculos y la formación de cadenas aumentan a medida que avanza la simulación en los pasos 4 a 6, hasta que en el paso 7 vemos que la cadena de vínculos ligados se ha cerrado sobre sí misma, encerrando al catalizador, tres vínculos y dos elementos de substrato. De este modo, la cadena ha for-

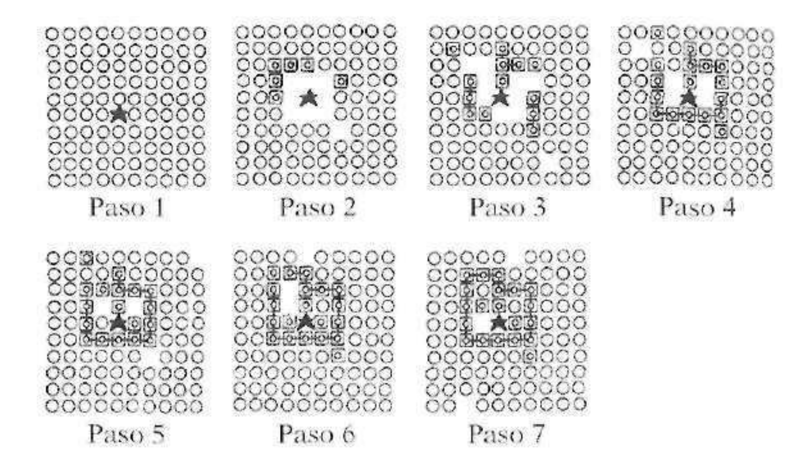


Figura 9-1
Simulación informática de una red autopoiésica.

[fiado un espacio permeable a los elementos de substrato pero no al catalizador. Cuando se produce esta situación, la cadena cerrada puede estabilizarse y convertirse en el límite de una red autopoiésica. En realidad, es lo que ha sucedido en la secuencia concreta mostrada. Los siguientes pasos en la simulación demostraron cómo ocasionalmente algunos vínculos del límite se desintegraban para ser reemplazados por nuevos vínculos producidos dentro del límite, en presencia del catalizador.

A largo plazo, la cadena continuó cerrando un espacio para el catalizador, mientras que sus vínculos continuaban desintegrándose y siendo reemplazados. De este modo, la cadena en símil de membrana se convertía en el límite de una red de transformaciones, al mismo tiempo que participaba activamente en esta red de procesos. En otras palabras, se había simulado una red autopoiesica.

El hecho de que una secuencia de esta simulación genere o no un patrón autopoiesico, depende esencialmente de la probabilidad de desintegración', es decir, de la frecuencia con que los vínculos se desintegren. Puesto que el delicado balance entre desintegración y «reparación» se basa en el movimiento aleatorio de los elementos de substrato a través de la membrana, en la producción aleatoria de nuevos vínculos y en el desplazamiento aleatorio de estos vínculos al lugar de la reparación, la membrana sólo permanecerá estable si todos estos procesos pueden ser completados antes de que ocurran otras desintegraciones. Los autores demostraron que con probabilidades de desintegración muy pequeñas, se pueden conseguir efectivamente patrones autopoiésicos viables.[13]

REDES BINARIAS

El autómata celular diseñado por Varela y sus colegas fue uno de los primeros ejemplos de cómo se pueden simular las redes autoorganizadoras de los sistemas vivos. En los últimos veinte años han sido estudiadas muchas otras simulaciones, quedando demostrado que estos modelos matemáticos pueden generar espontáneamente patrones complejos y altamente ordenados, exhibiendo algunos importantes principios de orden presentes en los sistemas vivos.

Estos estudios se intensificaron cuando se constató que las técnicas acabadas de desarrollar por la teoría de los sistemas dinámicos -atractores, retratos fase, diagramas de bifurcaciones, etc.- podían ser utilizadas como instrumentos eficientes en el análisis de modelos matemáticos de redes. Equipados con estas nuevas técnicas, los científicos estudiaron de nuevo las redes binarias desarrolladas en los años cuarenta y descubrieron que, aun no siendo redes autopoiésicas, su análisis conducía a sorprendentes revelaciones sobre los patrones en red de los sistemas vivos. Gran parte de este trabajo ha sido desarrollado por el biólogo evolucionista Stuarl Kauffman y sus colegas del Instituto de Santa Fe en Nuevo México.[14]

Dado que el estudio de los sistemas complejos con la ayuda de atractores y retratos fase está íntimamente ligado al desarrollo de la teoría del caos, era natural que Kauffman y sus colegas se preguntasen cuál era el papel del caos en los sistemas vivos. Estamos aún lejos de poder responder a esta pregunta, pero el trabajo de Kauffman ha aportado algunas ideas estimulantes. Para comprenderlas, debemos observar con mayor atención las redes binarias.

Una red binaria consiste en nodos susceptibles de dos valores distintos, convencionalmente etiquetados como sí y NO.* Se trata pues de un modelo más restrictivo que el autómata celular, cuyas células pueden tener más de dos valores. Por otro lado, los nodos de una red binaria no precisan estar dispuestos en una cuadrícula regular y permiten interconexiones más complejas.

* En esl original, o.v y *OFF. (N. del T.)*

Las redes binarias se denominan también «redes booleanas» en honor del matemático inglés George Boole, quien utilizó operaciones binarias («si-no») a mediados del siglo xix, para desarrollar una lógica simbólica conocida como el álgebra booleana. La figura 9-2 muestra una red binaria o booleana simple con seis nodos, cada uno conectado con tres vecinos, con tres nodos en posición sí (dibudjados en color negro) y cuatro en NO (dibujados en blanco).

Al igual que en el autómata celular, el patrón de nodos SÍ-NO de una red binaria cambia con pasos discretos. Los nodos se acoplan unos con otros de tal modo que el valor de cada nodo es determinado por los valores previos de sus vecinos, según alguna «regla de conexión». Por ejemplo, para la red representada en la figura 9-2 podemos escoger la siguiente regla: un nodo estará en sí en el siguiente paso cuando al menos dos de sus vecinos estén en sí en este paso, estando en NO en cualquier otro caso.

La figura 9-3 muestra tres secuencias generadas por esta regla. Vemos cómo la secuencia A alcanza un patrón estable con todos los nodos en sí después de dos pasos; la secuencia B da un paso y luego empieza a oscilar entre dos patrones complementarios, mientras que la secuencia C es estable desde el principio, reproduciéndose a cada paso. Para analizar matemáticamente secuencias como éstas, cada patrón o estado de la red es definido por seis variables binarias (SÍ-NO). A cada paso, el sistema va de un estado definido a un estado sucesor específico, completamente determinado por la regla de conexión.

Como en los sistemas descritos por ecuaciones diferenciales, cada estado puede ser representado por un punto de un espacio fase hexa-dimensional.[15] A medida que la red cambia paso a paso de un estado al siguiente, la sucesión de estados traza una trayectoria en dicho espacio fase. Entra entonces en juego el concepto de atractor para clasificar las trayectorias de diferentes secuencias. Así en nuestro ejemplo, la trayectoria A, que se mueve hacia un estado estable, se asocia con un atractor puntual, mientras que la oscilante trayectoria I* corresponde a un atractor periódico.

Kauffman y sus colegas utilizaron estas redes binarias para representar sistemas enormemente complejos: redes químicas y biológioas conteniendo miles de variables acopladas, que jamás podrían ser descritas por ecuaciones diferenciales.[16] Como en nuestro sencillo ejemplo, la sucesión de estados en estos sistemas complejos se asocia a una trayectoria en estado fase. Puesto que el número de estados posibles en toda red binaria es finito (aun-

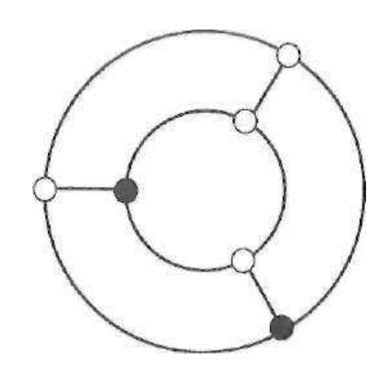


Figura 9-2
Una red binaria simple.

que pueda ser extremadamente elevado), el sistema debe retornar eventualmente a un estado que ya ha encontrado previamente. Cuando esto ocurre, el sistema repetirá todo el proceso, dado que su comportamiento está completamente determinado. Consecuentemente, pasará repetidamente por el mismo ciclo de estados. Estos ciclos de estados son los atractores periódicos (o cíclicos) de la red binaria. Toda red binaria tendrá como mínimo un atractor periódico, pudicndo tener más de uno. Por sí mismo, el sistema se instalará en uno de dichos atractores y permanecerá en él.

Los atractores periódicos, cada uno embebido en su cuenca de atracción, constituyen la característica matemática más importante de las redes binarias. La investigación exhaustiva ha demostrado que una gran variedad de sistemas vivos -incluyendo redes genéticas, sistemas inmunológicos, redes neuronales, sistemas de órganos y ecosistemas- pueden ser representados por redes binarias comprendiendo varios atractores alternativos.[17]

Los distintos ciclos de estados en una red binaria, pueden diferir ampliamente en longitud. En algunas redes pueden llegar a ser extraordinariamente largos, aumentando exponencialmente a medida que se incrementa el número de nodos. Kauffman ha definido como «caóticos» a los atractores de estos ciclos enormemente largos -que comprenden millones y millones de estados diferentes-, ya que su longitud, a efectos prácticos, es infinita.

El análisis detallado de redes binarias grandes en términos de sus atractores confirmó lo que los cibernéticos ya habían descubierto en los años cuarenta. Si bien algunas redes son caóticas, comprendiendo secuencias aparentemente aleatorias y atracto-

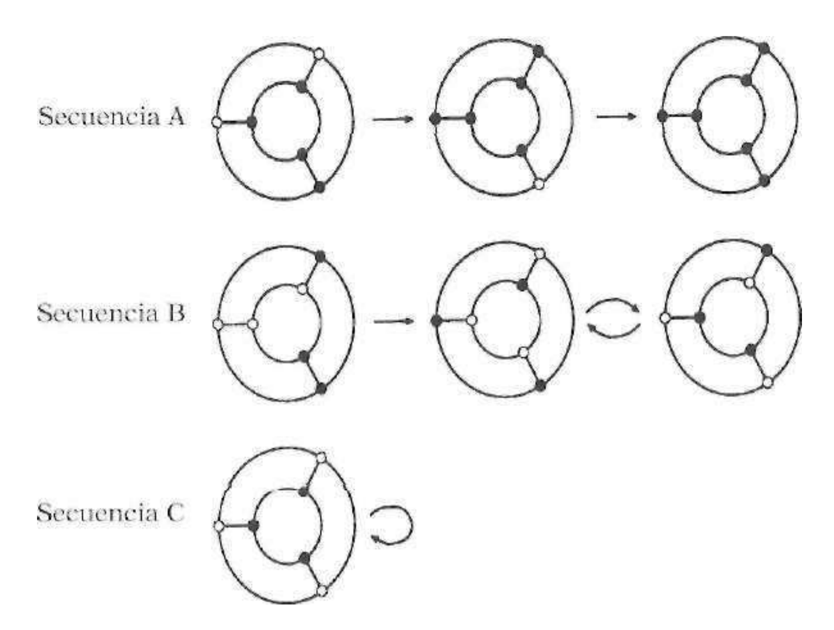


Figura 9-3
Tres secuencias de estados en una red binaria.

res infinitamente largos, otras generan pequeños atractores correspondientes a patrones de orden elevado. De este modo, el estudio de las redes binarias proporciona una perspectiva más del fenómeno de la autoorganización. Redes que coordinan las actividades mutuas de miles de elementos, pueden exhibir dinámicas altamente ordenadas.

AL BORDE DEL CAOS

Para investigar la relación exacta entre orden y caos en estos modelos, Kauffman examinó muchas redes binarias complejas y una variedad de reglas de conexión, incluyendo redes en las que el número de «entradas» o vínculos es diferente para distintos nodos. Descubrió que el comportamiento de estas complejas redes puede ser resumido en términos de dos parámetros: *N,* el número de nodos de la r*ed, y K,* el número medio de vínculos en cada nodo. Para valores de *K* por encima de 2 -es decir, para multiplicar redes interconectadas- el comportamiento es caótico, pero a medida que *K* disminuye y se aproxima a *2,* el orden cristaliza. Alternativamente, el orden puede también emerger a mayores valores de *K,* a condición de que las reglas de conexión sean «obviadas»: por ejemplo, si hay más posibilidades para sí que para NO.

Estudios detallados sobre la transición del caos al orden han demostrado que las redes binarias desarrollan un «núcleo congelado» de elementos a medida que el valor de *K se* acerca a 2. Estos núcleos son nodos que mantienen la misma configuración, en sí o en NO, mientras el sistema recorre su ciclo de estados. A medida que *K* se aproxima todavía más a 2, el núcleo congelado crea «muros de constancia» que crecen a través de todo el sistema, compartimentando la red en islas separadas de elementos cambiantes. Estas islas están fúncionalmente aisladas y los cambios de comportamiento en una isla no pueden pasar a través del núcleo congelado a otras islas. *Si K* disminuye aún más, las islas se congelan a su vez, el atractor periódico se convierte en un atractor puntual y toda la red alcanza un patrón estable y congelado.

Así, las redes binarias complejas exhiben tres grandes regímenes de comportamiento: un régimen ordenado con componentes congelados, un régimen caótico sin componentes congelados y una región limítrofe entre orden y caos donde los componentes congelados empiezan a «fundirse». La hipótesis central de Kauffman es que los sistemas vivos existen en esta región limítrofe cerca del «borde del caos». Argumenta que en las profundidades del régimen ordenado, las islas de actividad serían demasiado pequeñas y estarían demasiado aisladas para que el comportamiento complejo pudiera propagarse por el sistema. Dentro del régimen caótico, por otro lado, el sistema sería demasiado sensible a las pequeñas perturbaciones para mantener su organización. Así, la selección natural parece propiciar y mantener a los sistemas vivos «al borde del caos», por ser éstos más capaces de coordinar un comportamiento complejo y flexible y estar mejor dispuestos para adaptarse y evolucionar.

Para poner a prueba su hipótesis, Kauflman aplicó su modelo a las redes genéticas de organismos vivos y pudo extraer del experimento varias sorprendentes predicciones, bastante ajustadas.[18] Los grandes logros de la biología molecular, descritos a menudo como «el descifrado del código genético», nos hicieron pensar en las hebras de genes del ADN como algún tipo de ordenador bioquímico ejecutando un «programa genético». No obstante, investigaciones recientes han demostrado con creciente firmeza que esta creencia es bastante inexacta. De hecho, resulta tan inadecuada como la metáfora del cerebro como un ordenador proce-

sando información.[19] la serie completa de genes de un organismo -el llamado genoma- forma una vasta red interconectada, rica en bucles de retroalimentación, en la que los genes directa e indirectamente regulan mutuamente sus actividades. En palabras de Francisco Varela: «El genoma no es una disposición lineal de genes independientes (manifestados en rasgos), sino una red altamente entrelazada de múltiples efectos recíprocos mediatizados por represores y derrepresores, exones e intrones, genes móviles, e incluso proteínas estructurales.»[20]

Cuando Stuart Kaulfman empezó a estudiar esla compleja red genética, comprobó que cada gen de la red es regulado directamente sólo por otros pocos genes. Además, se sabe desde los años sesenta que la actividad de los genes, como la de las neuronas, puede representarse en términos de valores binarios SÍ-NO. Por lo tanto -se dijo Kauffman-, las redes binarias deberían ser representaciones apropiadas para los genomas. Efectivamente, así fue.

Un genoma puede pues ser representado por una red binaria «al borde del caos», es decir, una red con un núcleo congelado e islas separadas de nodos cambiantes. Tendrá un número relativamente reducido de ciclos de estados, representados en espacio fase por atractores periódicos embebidos en cuencas de atracción separadas. Semejante sistema puede sufrir dos tipos de perturbación. Una perturbación «mínima» es un cambio accidental temporal de un elemento binario en su estado opuesto. Se da el hecho de que cada ciclo de estados del modelo es notablemente estable bajo estas perturbaciones mínimas. Los cambios desencadenados por la perturbación quedan confinados en una determinada isla de actividad, y transcurrido un tiempo, la red retorna típicamente al ciclo de estados original. En otras palabras, el modelo exhibe la propiedad de homeostasis, característica en lodos los sistemas vivos.

La otra clase de perturbaciones es un cambio estructural permanente en la red -por ejemplo, un cambio en el patrón de conexiones o en la regla de conexión-, que corresponde a una mutación en el sistema genético. La mayoría de estas perturbaciones modifican asimismo el comportamiento de las redes al borde del caos solo ligeramente. Algunas, no obstante, pueden empujar su trayectoria a una cuenca de atracción distinta, lo que dará lugar a un nuevo ciclo de estados y consecuentemente a un nuevo patrón recurrente de comportamiento. Kauffman ve esto como un modelo plausible para la adaptación evolutiva:

> Las redes en la frontera entre orden y caos pueden tener la flexibilidad necesaria para adaptarse rápida y exitosamente mediante la acumulación de variaciones útiles. En semejantes sistemas equilibrados, la mayoría de las mutaciones tienen pequeñas consecuencias debido a la naturaleza homeostásica del sistema. Algunas mutaciones, sin embargo, causan mayores cascadas de cambio. Los sistemas en equilibrio se adaptarán entonces típicamente de forma gradual al medio en cambio, pero si fuese necesario, ocasionalmente pueden cambiar de forma rápida.[21]

Otra serie de impresionantes características aclaratorias del modelo de Kauffman concierne a los fenómenos de diferenciación celular en el desarrollo de organismos vivos. Es bien conocido que todos los tipos de células de un organismo, a pesar de sus muy diversas formas y funciones, contienen básicamente las mismas instrucciones genéticas. Los biólogos del desarrollo han deducido de este hecho que los tipos de células difieren entre sí no porque contengan diferentes genes, sino porque los genes que están *activos* en ellas difieren. En otras palabras, la estructura de una red genética es la misma para todas las células, pero los patrones de actividad genética son distintos, y puesto que diferentes patrones de actividad genética corresponden a ciclos de estados distintos en la red binaria, Kauffman sugiere que los diversos tipos de células pueden corresponder a diferentes ciclos de estados y, consecuentemente, a atractores distintos.

Este «modelo atractor» de diferenciación celular conduce a varias predicciones interesantes.[22] Cada célula del cuerpo humano contiene alrededor de 100.000 genes. En una red binaria de semejante tamaño, el número de posibilidades de diferentes patrones de expresión genética es astronómico. No obstante, el número de atractores de dicha red al borde del caos es aproximadamente la raíz cuadrada del número de sus elementos, con lo que una red de 100.000 genes se expresaría con unos 317 tipos de células. Este número, deducido de características muy generales del modelo de Kaulfman, se aproxima notablemente a los 254 tipos distintos de células identificados en el ser humano.

Kauffman ha probado también su modelo atractor con predicciones para el número de tipos de células de varias otras especies, y ha encontrado que también en éstas parece estar relacionado con el número de genes. La figura 9-4 muestra sus resultados para varias especies.[23] El número de tipos de células y

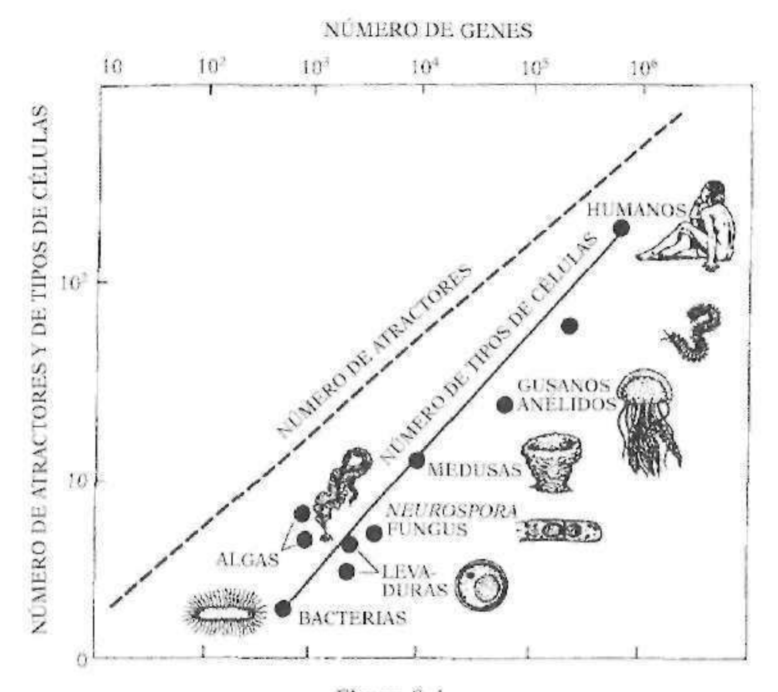


Figura 9-4
Relaciones entre el número de genes, de tipos de células y de atractores en las correspondientes redes binarias para diferentes especies.

el número de atractores de las correspondientes redes binarias ascienden casi en paralelo con el número de genes.

Otras dos predicciones del modelo atractor de Kauffman conciernen a la estabilidad de los tipos de células. Puesto que el núcleo congelado de la red binaria es prácticamente igual para todos los atractores, todos los tipos de células de un organismo deberían expresar aproximadamente la misma serie de genes, difiriendo únicamente por la expresión de un pequeño porcentaje de éstos. Éste es electivamente el caso en todos los organismos vivos.

El modelo atractor sugiere también que en el proceso de desarrollo son creados nuevos tipos de célula al empujar al sistema de una cuenca de atracción a otra. Puesto que cada cuenca de atracción tiene sólo unas pocas cuencas adyacentes, cualquier tipo único de célula se diferenciará siguiendo caminos hacia sus vecinos inmediatos, de éstos a otros vecinos adicionales y así sucesivamente, hasta que todo el conjunto de tipos celulares haya sido creado. En otras palabras, la diferenciación celular debería ocu-

rrir a lo largo de sucesivos caminos cruzados. De hecho, es bien conocido por los biólogos que, durante casi seiscientos millones de años, toda la diferenciación celular en los organismos multicelulares se ha organizado sobre este patrón.

VIDA EN SU FORMA MÍNIMA

Además de desarrollar simulaciones por ordenador de varias redes autoorganizadoras -tanto autopoiésicas como no autopoiésicas-, los biólogos y los químicos han conseguido recientemente sintetizar sistemas químicos autopoiésicos en laboratorio. Esta posibilidad fue sugerida en el terreno teórico por Francisco Varela y Pier Luigi Luisi en 1989 y posteriormente realizada en dos experimentos por Luisi y sus colegas de la Universidad Politécnica de Suiza (ETH) en Zurich.[24] Estos nuevos avances conceptuales y experimentales han acentuado notablemente la discusión sobre qué constituye vida en su forma mínima.

La autopoiesis, como hemos visto, es definida como un patrón en red en el que la función de cada componente es participar en la producción o transformación de otros componentes. El biólogo y filósofo Gail Fleischaker ha resumido las propiedades de una red autopoiésica basándose en tres criterios: el sistema debe ser autolimitado. autogenerador y autoperpetuante.[25] Ser *autolimitado* significa que la extensión del sistema queda delimitada por un perímetro que es parte integrante de la red. Ser *autogenerador* quiere decir que todos los componentes, incluyendo los del perímetro, son fruto de procesos de la red. Ser *autoperpetuante* significa que los procesos de producción perduran en el tiempo, de modo que todos los componentes son continuamente reemplazados por los procesos de transformación del sistema.

Si bien la célula bacterial es el sistema autopoiésico más simple hallado en la naturaleza, los recientes experimentos de la ETH demuestran que se pueden producir en laboratorio estructuras químicas que satisfagan los criterios de organización autopoiésica. La primera de estas estructuras, sugerida por Varela y Luisi en su trabajo teórico, es conocida por los químicos como «micela».'- Es básicamente una gota de agua rodeada por una

**' Nombre con que se designa cada uno de los agregados moleculares constitutivos de la fase dispersa de un sistema coloidal. *(N. del T.)*

fina capa de moléculas en forma de renacuajo, con «cabezas» que atraen el agua y «colas» que la repelen (ver figura 9-5).

Bajo circunstancias especiales, una gota así puede albergar reacciones químicas y producir ciertos componentes que se organizarán como verdaderas moléculas perimetrales que construirán la estructura y proveerán las condiciones para que puedan producirse las reacciones. De este modo, se crea un simple sistema autopoiésico. Al igual que en la simulación por ordenador de Varela, las reacciones están encerradas por un perímetro formado con los propios productos de estas reacciones.

Tras este primer ejemplo de química autopoiésica, los investigadores de la ETH consiguieron crear otro tipo de estructura química aún más relevante para los procesos celulares, ya que sus ingredientes principales -llamados ácidos grasos- son considerados como la materia prima para las primitivas paredes celulares. Los experimentos consistieron en producir gotas esféricas de agua rodeadas por cáscaras de dichas materias grasas, que poseen la típica estructura semipermeable de las membranas biológicas (pero sin sus componentes proteicos) y generar bucles catalíticos que den lugar a un sistema autopoiésico. Los investigadores que desarrollaron estos experimentos especulaban con la posibilidad de que esta clase de sistemas podrían haber sido las primeras estructuras químicas cerradas autorreproductoras, anteriores a la evolución de la célula bacterial. De ser esto cierto, significaría que los científicos habrían sido capaces de recrear las primeras formas mínimas de vida.

ORGANISMOS Y SOCIEDADES

La mayoría de las investigaciones en la Leoría de la autopoiesis, se ha ocupado hasta el momento de sistemas autopoiésicos mínimos: células simples, simulaciones por ordenador y las recientemente descubiertas estructuras químicas aulopoiésicas. Se ha realizado muchísimo menos trabajo en el estudio de la autopoiesis de organismos multicelulares, ecosistemas y sistemas sociales. Las ideas actuales sobre los patrones en red de estos sistemas vivos son aún bastante especulativas.[26]

Todos los sistemas vivos son redes de componentes más pequeños; la trama de la vida como un todo es una estructura multinivel de sistemas vivos que anidan en el interior de otros: redes dentro de redes. Los organismos son agregados de células autó-

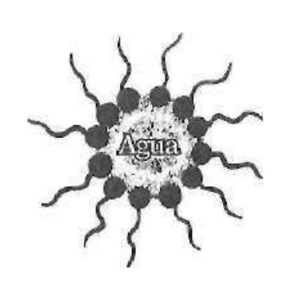


Figura 9-5
Forma básica de una gota «Micela».

nomas pero íntimamente vinculadas; las poblaciones son redes de organismos autónomos pertenecientes a especies únicas y los ecosistemas son redes de organismos, tanto mono como multicelulares, pertenecientes a diferentes especies.

Lo que tienen todos estos sistemas en común es que sus componentes vivos son siempre células; por tanto, podemos afirmar sin duda alguna que todos los sistemas vivos son, en última instancia, autopoiésicos. No obstante, resulta interesante plantearse si estos sistemas mayores formados por células aulopoiésicas -organismos, sociedades y ecosistemas- son en sí mismos redes aulopoiésicas.

En su libro *El Árbol del Conocimiento*, Maturana y Varela argumentan que nuestro conocimiento actual sobre los detalles de los caminos metabólicos en organismos y ecosistemas no es suficiente para ofrecer una respuesta clara y, en consecuencia, dejan abierta la cuestión:

> Lo que podemos decir es que [los sistemas multicelulares] disponen de *clausura operacional* en su organización: su identidad está especilicada por una red de procesos dinámicos cuyos Rectos no salen de la red. Pero, en relación con la forma explícita de esta orgánización, no podemos decir más.[2"7]

Los autores continúan señalando que los tres tipos de sistemas vivos multicelulares -organismos, sociedades y ecosistemas-difieren ampliamente en los grados de autonomía de sus componentes. En los organismos, los componentes celulares tienen un grado anirnal de existencia independiente, mientras que los miembros de las sociedades humanas, seres humanos individuales, tienen un grado máximo de autonomía, disfrutando de múlti-

pies dimensiones de existencia independiente. Las sociedades animales y los ecosistemas ocupan espacios diversos entre estos dos extremos.

Las sociedades humanas constituyen un caso especial debido al papel crucial que juega en ellas el lenguaje, que Maturana ha identificado como el fenómeno crítico en el desarrollo de la consciencia y la cultura humanas.[28] Mientras que la cohesión de los insectos sociales se basa en el intercambio de compuestos químicos entre sus individuos, la unidad de las sociedades humanas se basa en el intercambio de lenguaje.

Los componentes de un organismo existen para el funcionamiento de éste, pero los sistemas sociales humanos existen también *para sus componentes,* los seres humanos individuales. Así, en palabras de Maturana y Varela:

> El organismo restringe la creatividad individual de sus unidades componentes, ya que éstas existen para el organismo. El sistema social humano amplifica la creatividad individual de sus componentes, puesto que existe para estos componentes.[29]

Los organismos y las sociedades humanas son por tanto tipos muy distintos de sistemas vivos. Los regímenes políticos totalitarios han restringido a menudo severamente la autonomía de sus miembros, y al hacerlo, los han despersonalizado y deshumanizado. Así pues, las sociedades fascistas funcionan más como organismos y no es por casualidad que los dictadores hayan gustado a menudo de utilizar la metáfora de la sociedad como un organismo vivo.

AUTOPOIESIS EN EL DOMINIO SOCIAL

La cuestión de si los sistemas sociales pueden o no ser considerados autopoiésicos ha sido discutida extensamente y diferentes autores han propuesto diferentes respuestas.[30] El problema central es que la autopoiesis ha sido definida precisamente sólo para sistemas en espacio físico y simulaciones informáticas en espacio matemático. Debido al «mundo interior» de conceptos, ideas y símbolos que surge con el pensamiento, la consciencia y el lenguaje, los sistemas sociales humanos no existen únicamente en el dominio físico, sino también en el simbólico social.

Así, una familia humana puede ser descrita como un sistema biológico definido por ciertas relaciones sanguíneas, pero también como un «sistema conceptual» definido por ciertos papeles y relaciones que pueden coincidir o no con las relaciones de sanguineidad entre sus miembros. Estos roles dependen de la convención social y pueden variar substancialmente en distintos períodos de tiempo y en diferentes culturas. Por ejemplo, en la cultura occidental contemporánea, el papel de «padre» puede ser desempeñado por el padre biológico, un padre adoptivo, un suegro, un tío o un hermano mayor. En otras palabras, estos papeles no son características objetivas del sistema familiar, sino que son construcciones sociales flexibles y continuamente renegociables.[31]

Mientras que el comportamiento en el terreno físico está gobernado por causa y electo -las llamadas «leyes de la naturaleza»-, en el terreno social se rige por normas generadas por el sistema social y frecuentemente codificadas en forma de leyes. La diferencia crucial estriba en que las reglas sociales pueden romperse, pero las naturales no. Los seres humanos pueden escoger entre obedecer una regla social o no; las moléculas no pueden escoger si deben o no interactuar.[32]

Dada la existencia simultánea de los sistemas sociales en los dos dominios -el físico y el social-, ¿tiene algún significado aplicarles el concepto de autopoiesis?, y si lo tiene, ¿en qué dominio debe ser aplicado?

Tras dejar esta cuestión abierta en su libro, Maturana y Varela han expresado por separado puntos de vista ligeramente distintos. Maturana no ve los sistemas sociales como autopoiésicos, sino más bien como el medio en el que los humanos realizan su autopoiesis biológica a través del «lenguajeo».*[33] Varela argumenta que el concepto de red de producción de procesos, que está en el corazón mismo de la definición de autopoiesis, puede no ser de aplicación más allá del dominio físico, pero que un concepto más amplio de «clausura organizativa» puede ser definido para los sistemas sociales. Este concepto más amplio es similar al de autopoiesis pero no especifica procesos de producción.[34] La autopoiesis, según Varela, puede ser contemplada como un caso especial de clausura organizativa, manifestado a nivel celular en ciertos sistemas químicos.

Otros autores han afirmado que una red autopoiésica *puede*

* En el original, languaging>. *(N. del T.)*

ser definida si la descripción de los sistemas sociales humanos permanece estrictamente dentro del dominio social. Esta escuela de pensamiento Fue encabezada en Alemania por el sociólogo Nicklas Luhmann, quien ha desarrollado el concepto de autopoiesis en considerable detalle. El argumento central de Luhmann consiste en identificar los procesos sociales de la red autopoiésica como procesos de comunicación:

> Los sistemas sociales usan la comunicación como su modo particular de reproducción autopoiésica. Sus elementos son comunicaciones que son... producidas y reproducidas por una red de comunicaciones y que no pueden existir lucra de dicha red.[35]

Un sistema familiar, por ejemplo, puede ser definido como una red de conversaciones que exhibe circularidades inherentes. Los resultados de las conversaciones dan lugar a otras conversaciones, de modo que se constituyen los bucles de retroalimentación autoamplificadora. La clausura de la red consiste en un sistema compartido de creencias, explicaciones y valores -un contexto de significado, que es constantemente mantenido mediante más conversaciones.

Los actos comunicativos de la red de conversaciones incluyen la «autoproducción» de los papeles por los que son definidos los distintos miembros y del sistema de límite de la familia. Puesto que todos estos procesos tienen lugar en el dominio simbólico social, el perímetro no puede ser físico. Es un recinto de expectativas confidencialidad, lealtad, etc. Tanto los papeles familiares como su perímetro son continuamente mantenidos y renegociados por la red autopoiésica de las conversaciones.

EL SISTEMA GAIA

Mientras el debate sobre la autopoiesis en los sistemas sociales ha sido muy vivo en los últimos años, resulta sorprendente el silencio casi total sobre la cuestión de la autopoiesis en los ecosistemas. Podemos estar de acuerdo con Maturana y Varela en que los múltiples caminos y procesos de los ecosistemas no son aún lo suficientemente conocidos como para poder decidir si tales redes pueden o no ser consideradas autopoiésicas. No obstante, resultaría sin duda tan interesante iniciar las discusiones

sobre autopoiesis con los ecólogos, como lo ha sido con los científicos sociales.

Para empezar, podemos decir que una de las funciones de todos los componentes de una cadena trófica es la transformación de otros componentes de la misma red. Cuando las plantas absorben materia inorgánica del medio para producir compuestos orgánicos y éstos circulan a través del ecosistema para servir de alimento de los procesos de producción de estructuras más complejas, toda la red se regula a través de múltiples bucles de retroalimentación.[36] Continuamente mueren componentes individuales de la red alimentaria, que son descompuestos y reemplazados por los propios procesos de transformación de la red. Queda por ver si todo esto es o no suficiente para definir a los ecosistemas como autopoiésicos y esta decisión dependerá, entre otras cosas, de un claro entendimiento del perímetro del sistema.

Cuando desplazamos nuestra atención desde los ecosistemas al planeta como un todo, nos encontramos con una red global de procesos de producción y transformación, que ha sido descrita detalladamente en la teoría Gaia por James Lovelocky Lynn Margulis.[37] En realidad, quizás haya actualmente más evidencia de la naturaleza autopoiésica del sistema Gaia, que de la de los ecosistemas.

El sistema planetario opera a gran escala física y sobre largos períodos de tiempo. No resulta pues fácil pensar en Gaia como un sistema vivo de un modo concreto. ¿Está vivo todo el planeta o solamente algunas de sus partes? En este caso, ¿qué partes? Para facilitar la comprensión de Gaia como un sistema vivo, Lovelock ha sugerido la analogía con un árbol.[38] Cuando el árbol crece, hay sólo una fina capa de células vivas en su perímetro, justo debajo de la corteza. Toda la madera de su interior -más de un 97 % del árbol- es materia muerta. De forma parecida, la Tierra está cubierta con una fina película de organismos vivos -la bioslera-, que profundiza en los océanos unos diez mil metros y asciende otro tanto en la atmósfera. Así pues, la parte viva de Gaia no es más que una delgada capa que rodea el globo. Si representásemos el planeta por una esfera del tamaño de una pelota de baloncesto, el grueso de la biosfera equivaldría al de ¡la pintura!

Al igual que la corteza del árbol protege su fina capa de tejido vivo, la vida sobre la Tierra está rodeada por la capa protectora de la atmósfera, que nos resguarda de la radiación ultravioleta y de otras influencias perjudiciales, manteniendo al mismo tiempo la

temperatura del planeta en el punto justo necesario para el florecimiento de la vida. Ni la atmósfera sobre nuestras cabezas, ni las rocas bajo nuestros pies, están vivas, pero ambas han sido considerablemente moldeadas y transformadas por los organismos vivos, exactamente igual que la corteza y la madera del árbol de nuestro ejemplo. Tanto el espacio exterior como el interior de la Tierra son parte del medio de Gaia.

Para analizar si podemos electivamente describir el sistema de Gaia como una red autopoiésica, aplicaremos los tres criterios propuestos por Gail Fleischaker.[31]' Gaia está sin duda a*utolimitada,* al menos hasta donde concierne a la atmósfera, su perímetro exterior. Según la teoría Gaia, la atmósfera de la Tierra está creada, transformada y mantenida por los procesos metabólicos de la biosfera. Las bacterias juegan un papel crucial en dichos procesos, influyendo en la proporción de reacciones químicas y actuando así como el equivalente de las enzimas en una célula.[40] La atmósfera es semipermeable -al igual que la membrana de una célula- y forma parte de la red planetaria.

Por ejemplo, creó el invernadero protector en el que la vida temprana pudo desplegarse hace tres mil millones de años, incluso bajo un sol un 25 % menos luminoso que el actual.[41]

El sistema Gaia es también claramente a*utogenerador.* El metabolismo planetario convierte substancias inorgánicas en orgánicas y en materia viva, restituyéndolas después al suelo, a los océanos y al aire. Todos los componentes de la red de Gaia, incluyendo a los del perímetro atmosférico, son fruto de procesos de la red.

Una característica clave de Gaia es el complejo entrecruzado de sistemas vivos y no vivos en una misma red. Ello origina bucles de retroalimentación de escalas ampliamente distintas. Los ciclos de las rocas, por ejemplo, se extienden a lo largo de cientos de millones de años, mientras que los organismos asociados con ellos tienen vidas muy cortas. En la metáfora de Stephan Harding, ecólogo y colaborador de James Lovelock: «Los seres vivos nacen de las rocas y retornan a ellas.»[42]

Finalmente, el sistema Gaia es evidentemente *autoperpetuante.* Los componentes de los océanos, suelo y aire, así como los organismos de la biosfera, son continuamente reemplazados por los procesos planetarios de producción y transformación.

Así pues, parece que la evidencia del sistema Gaia como red autopoiésica es irrefutable. En realidad, Lynn Margulis, coautora de la teoría Gaia, afirma con seguridad: «Cabe poca duda de

que la pátina planetaria -incluyéndonos a nosotros- sea autopoiésica.»[43]

La confianza de Lynn Margulis en la idea de una red planetaria autopoiésica se basa en tres décadas de trabajo de vanguardia en microbiología. Para comprender la complejidad, diversidad y capacidad de organización de la red de Gaia, resulta absolutamente indispensable una profunda comprensión del microcosmos, es decir, de la naturaleza, extensión, metabolismo y evolución de los microorganismos. Margulis ha sido capaz no sólo de contribuir en gran medida a esta comprensión en el seno de la comunidad científica, sino también de transmitir, en colaboración con Dorion Sagan, sus descubrimientos radicales al lector común en un claro y sugestivo lenguaje.[44]

La vida sobre la Tierra empezó hace aproximadamente tres mil quinientos millones de años. Durante los primeros dos mil, el mundo vivo consistió únicamente en microorganismos. En los primeros mil millones de años de evolucionen, las bacterias -la forma más básica de vida- cubrieron el planeta con una intrincada red de procesos metabólicos y empezaron a regular la temperatura y la composición química de la atmósfera, algo que fue favorable para la evolución de formas superiores de vida.[45]

Las plantas, los animales y los seres humanos son los recién llegados a la Tierra, habiendo emergido del microcosmos hace menos de mil millones de años. Incluso hoy, los organismos vivos visibles funcionan sólo gracias a sus bien desarrolladas conexiones con la red de vida bacteriana. «Lejos de haber dejado atrás a los microorganismos en alguna "escalera" evolutiva», escribe Margulis, «estamos rodeados y compuestos a la vez por ellos... Debemos vernos a nosotros mismos y a nuestro entorno como un mosaico evolutivo de vida microcósmica.»[46]

Durante la larga historia de la evolución de la vida, se ha extinguido más del 99 % de todas las especies que han existido, pero la red bacteriana ha sobrevivido, perseverando en su regulación de las condiciones aptas para la vida sobre la Tierra, como lo había hecho a lo largo de los tres mil millones de años precedentes. Según Margulis, el concepto de una red planetaria autopoiésica está justificado porque toda la vida está embebida en una red bacteriana autoorganizadora, que incluye complicadas redes de sistemas sensores y de control que tan sólo empezamos a percibir. Miríadas de bacterias que habitan en el suelo, las rocas y los océanos, así como en el interior de todas las plantas, animales y seres humanos, regulan continuamente la vida sobre la Tierra:

¿

«Son las propiedades de crecimiento, metabolismo e intercambio de gases de los microbios... que forman los complejos sistemas físicos y químicos de retroalimentación que modulan la biosfera en la que vivimos.»[47]

EL UNIVERSO EN SU TOTALIDAD

Reflexionando sobre el planeta como un ser vivo, uno se ve naturalmente abocado a plantear cuestiones sobre sistemas a escalas aún mayores. ¿Es el sistema solar una red autopoiésica? ¿Y la galaxia? ¿Y qué decir del universo como un todo? ¿Está vivo el universo?

Contemplando el sistema solar, podemos decir con alguna seguridad que no parece ser un sistema vivo. En realidad, fue la sorprendente diferencia entre la Tierra y los demás planetas del sistema solar lo que movió a Lovelock a formular la hipótesis Gaia. En el ámbito de nuestra galaxia, la Vía Láctea, estamos muy lejos de poseer los datos necesarios para plantearnos la cuestión de si está o no viva, y si desplazamos nuestra atención al universo como un todo, alcanzamos los límites de la conceptualización.

Para muchas personas -entre las que me incluyo- resulta filosófica y espiritualmente más satisfactorio asumir que el cosmos como un todo está vivo, que pensar en la vida sobre la Tierra aislada en un universo sin vida. Dentro del marco de la ciencia, sin embargo, no podemos -al menos por ahora- hacer tales afirmaciones. Si aplicamos nuestros criterios científicos para la vida al universo entero, nos encontramos con serias dificultades conceptuales.

Los sistemas vivos se definen como abiertos a un (lujo constante de materia y energía. Pero ¿cómo podemos pensar en el universo, que por definición lo incluye todo, como un sistema abierto? La cuestión no parece tener mayor sentido que preguntarse qué ocurrió antes del Big Bang. En palabras del renombrado astrónomo Sir Bernard Lovell:

> Ahí alcanzamos la gran barrera del pensamiento... Me siento como si de repente hubiese entrado en un banco de niebla, en el que el mundo conocido se esfuma.[48]

Algo que *sí podemos* decir del universo es que el potencial de vida existe en abundancia en lodo el cosmos. La investigación en

las úlltimas décadas ha proporcionado una imagen bastante clara de las condiciones geológicas y químicas que hicieron posible la aparición de vida en la Tierra temprana. Hemos empezado a comprender cómo se desarrollaron sistemas químicos cada vez más complejos y cómo éstos constituyeron bucles catalíticos que, en su momento, evolucionaron hasta sistemas autopoiésicos.[49]

Observando el universo en general y nuestra galaxia en particular, los astrónomos han descubierto que los componentes químicos característicos encontrados en toda vida, están presentes en abundancia. Para que pueda emerger vida de estos compuestos, es preciso un delicado equilibrio de temperaturas, presiones atmosféricas, contenido de agua y demás. Parece probable que, durante la larga evolución de la galaxia, este equilibrio haya sido alcanzado en muchos de los planetas de los miles de millones de sistemas planetarios que contiene la galaxia.

Incluso en nuestro sistema solar, tanto Venus como Marte tuvieron probablemente océanos en su historia temprana, en los que podría haber emergido vida.[50] Pero Venus estaba demasiado cerca del Sol para un proceso evolutivo lento. Sus océanos se evaporaron y su hidrógeno fue separado de las moléculas de agua por la potente radiación ultravioleta, para perderse en el espacio. No sabemos cómo perdió Marte su agua, sólo sabemos que sucedió. Lovelock especula que quizás Marte tenía vida en sus primeras etapas y la perdió en algún suceso catastrófico, o que quizás su hidrógeno escapó mucho más deprisa que el de la Tierra debido a su fuerza gravitatoria mucho menor.

Sea como sea, parece que la vida «casi» evolucionó en Marte y que, con toda probabilidad, lo hizo y sigue floreciendo en millones de otros planetas del universo. Así, aunque el concepto del universo como un todo vivo resulte problemático dentro del marco de la ciencia actual, podemos afirmar con seguridad que la vida está presente en gran abundancia a través del cosmos.

ACOPLAMIENTO ESTRUCTURAL

Donde vemos vida, desde las bacterias hasta los ecosistemas a gran escala, observamos redes con componentes que interactúan entre sí de tal modo que la red entera se autorregula y organiza. Dado que estos componentes, a excepción de los de las redes celulares, son en sí mismos sistemas vivos, una imagen realista de las redes autopoiésicas deberá incluir una descripción del modo

en que los sistemas vivos interactúan entre sí y más generalmente con su entorno. En realidad, una descripción en dichos términos es parte integrante de la teoría de la autopoiesis desarrollada por Maturana y Varela.

La principal característica de un sistema aulopoiésico es que experimenta cambios estructurales continuos, mientras que preserva su patrón de organización en forma de red. Los componentes de la red se producen y transforman mutuamente sin cesar y lo hacen de dos modos distintos. Un tipo de cambios estructurales corresponde a cambios de autorrenovación. Todo organismo vivo se renueva a sí mismo constantemente: células que se fragmentan y construyen estructuras, tejidos y óiganos que reemplazan sus células en ciclos continuos, etc. A pesar de este cambio constante, el organismo mantiene su identidad total o patrón de organización.

Muchos de estos cambios cíclicos ocurren mucho más rápido que lo que podríamos pensar. Nuestro páncreas, por ejemplo, reemplaza la mayoría de sus células cada veinticuatro horas, las células del recubrimiento de nuestro estómago se reproducen cada tres días, las células blancas de nuestra sangre son renovadas cada diez días y el 98 % de las proteínas de nuestro cerebro tiene una rotación de menos de un mes. Más sorprendente todavía, nuestra piel reemplaza sus células a un ritmo de ¡cien mil células por minuto! De hecho, la mayor parte del polvo en nuestras casas consiste en células de piel muertas.

El otro tipo de cambios estructurales en un sistema vivo son aquellos en que son creadas nuevas estructuras, nuevas conexiones en la red autopoiésica. Estos cambios del segundo tipo -más desarrollistas que cíclicos- también tienen lugar continuamente, bien como consecuencia de influencias del medio, bien como resultado de la dinámica interna del sistema. Una membrana celular por ejemplo, incorpora continuamente substancias de su entorno a los procesos metabólicos de la célula. El sistema nervioso de un organismo cambia su conectividad con cada percepción sensorial. No obstante, estos sistemas vivos son autónomos; el medio únicamente desencadena los cambios estructurales, no los especifica ni dirige.[51]

El acoplamiento estructural, según definición de Maturana y Varela, establece una clara diferencia entre los modos en que los sistemas vivos y no vivos interactúan con sus entornos. Chutar una piedra o darle una patada a un perro son dos cosas muy distintas, como gustaba de señalar Gregory Bateson. La piedra *reaccionará* a la patada de acuerdo con una cadena lineal de causa y efecto. Este comportamiento podrá calcularse aplicando las leyes básicas de la mecánica newtoniana. El perro *responderá* con cambios estructurales según su propia naturaleza y patrón (no-lineal) de organización. El comportamiento resultante será generalmente impredecible.

A medida que un organismo vivo responde a las influencias exteriores con cambios estructurales, éstos afectarán a su vez su futuro comportamiento. En otras palabras, un sistema estruclu-ralmente acoplado, es un sistema que aprende. Mientras viva, un organismo se acoplará estructuralmente a su entorno. Sus continuos cambios estructurales en respuesta al medio -y consecuentemente su continua adaptación, aprendizaje y desarrollo- son las características clave del comportamiento de los seres vivos. Debido a este acoplamiento estructural, llamamos inteligente al comportamiento de un animal, pero no utilizaríamos este término para el de una roca.

DESARROLLO Y EVOLUCIÓN

A medida que sigue interactuando con su entorno, un organismo vivo sufrirá una serie de cambios estructurales y con el tiempo formará su propio camino individual de acoplamiento estructural. En cualquier punto de este camino, la estructura del organismo es el historial de sus cambios estructurales anteriores y, por lo tanto, de interacciones pasadas. La estructura viva es siempre un diario del desarrollo previo y la/ontogenia -el curso del desarrollo de un organismo individual- es la historia de los cambios estructurales del organismo.

Ahora bien, puesto que la estructura de un organismo en cualquier punto de su desarrollo es el historial de sus cambios estructurales precedentes, y dado que cada cambio estructural afecta al comportamiento futuro del organismo, ello implica que el comportamiento de un organismo vivo es determinado por su estructura. Así pues, un sistema vivo estará determinado en distintos modos por su patrón de organización y por su estructura. El patrón de organización determina la identidad del sistema (sus características esenciales); la estructura, formada por una secuencia de cambios estructurales, determina el comportamiento del sistema. En la terminología de Maturana, el comportamiento de un sistema vivo está «estructuralmente determinado».

Este concepto de determinismo estructural arroja nueva luz sobre el debate filosófico de todos los tiempos sobre libertad y determinismo. Según Maturana, el comportamiento de un organismo vivo está determinado. No obstante, más que estarlo por fuerzas exteriores, lo es por la propia estructura del organismo: una estructura formada por una sucesión de cambios estructurales autónomos. De este modo, el comportamiento del organismo vivo está determinado y es libre a la vez.

Más aún, el hecho de que el comportamiento esté estructuralmente determinado, no significa que sea predecible. La estructura del organismo simplemente «condiciona el curso de sus interacciones y restringe los cambios estructurales que las interacciones pueden desencadenar en él».[52] Por ejemplo, cuando un sistema vivo alcanza un punto de bifurcación -según la descripción de Prigogine-, su historial de acoplamiento estructural determinará qué caminos se le abren, pero seguirá siendo impredecible cuál de ellos tomará.

Al igual que la teoría de Prigogine de las estructuras disipativas, la teoría de la autopoiesis demuestra que la creatividad -la generación de configuraciones que son constantemente nuevas- es una propiedad fundamental en todos los sistemas vivos. Una forma especial de esta creatividad es la generación de diversidad a través de la reproducción, desde la simple división celular hasta la altamente compleja danza de la reproducción sexual. Para la mayoría de los organismos vivos, la ontogenia no es un camino lineal de desarrollo sino un ciclo, y la reproducción es un paso vital en cada ciclo.

Hace miles de millones de años, las habilidades combinadas de los sistemas vivos para reproducirse y generar novedad, condujeron naturalmente a la evolución biológica; un despliegue creativo de vida que sigue en un ininterrumpido proceso desde entonces. Desde sus formas más arcaicas y simples hasta las más intrincadas y complejas contemporáneas, la vida se ha desplegado en una danza continua, sin romper jamás el patrón básico de sus redes autopoiésicas.

10. EL DESPLIEGUE DE LA VIDA

Una de los frutos más valiosos de la emergente teoría de los sistemas vivos es la nueva comprensión de la evolución que implica. En lugar de entender la evolución como el resultado de mutaciones aleatorias y selección natural, estamos empezando a reconocer el despliegue creativo de vida en formas de creciente diversidad y complejidad, como una característica inherente a todos los sistemas vivos. Si bien mutación y selección natural siguen siendo consideradas aspectos importantes de la evolución biológica, la atención se centra en la creatividad, en el constante avance de lo vivo hacia la novedad.

Para comprender la diferencia fundamental entre las viejas y las nuevas visiones de la evolución, nos resultará útil revisar brevemente la historia del pensamiento evolucionista.

DARWINISMO Y NEODARWINISMO

La primera teoría de la evolución fue formulada a principios del siglo xix por Jean Baplisle Lamarck, un naturalista autodidacta que acuñó el término «biología» y realizó extensos estudios en botánica y zoología. Lamarck observó que los animales cambiaban bajo la presión del entorno y pensó que podían transmitir estos cambios a sus descendientes. Esta transmisión de características adquiridas era para él el mecanismo principal de la evolución.

Si bien Lamarck resultó estar equivocado sobre este aspecto, su reconocimiento del fenómeno de la evolución -la aparición de estructuras biológicas nuevas en la historia de las especies- fue una percepción revolucionaria que afectó profundamente a todo el pensamiento científico subsiguiente. En particular, Lamarck

ejerció una fuerte influencia sobre Charles Darwin, quien empezó su carrera como geólogo pero se interesó por la biología durante su famosa expedición a las islas Galápagos. Su atenta observación de la fauna local estimuló a Darwin a especular sobre el efecto del aislamiento geográfico en la formación de especies y le condujo, en su momento, a la formulación de su teoría de la evolución.

Darwin publicó esta teoría en 1859 en su trabajo monumental titulado *El origen de las especies por medio de la selección natural,* completado doce años después con *La descendencia, humana* y *la selección sexual,* en el que el concepto de transformación evolutiva de una especie en otra distinta, se extiende hasta los seres humanos. Darwin basó su teoría en dos ideas fundamentales: la variación al azar (denominada más tarde mutación aleatoria) y la selección natural.

En el centro del pensamiento darwiniano reside la convicción de que todos los organismos vivos están emparentados por ascendencia común. Todas las formas de vida han aparecido de dicha ascendencia mediante procesos de variación, a lo largo de miles de millones de años de historia geológica. En este proceso evolutivo, se producen muchas más variaciones de las que pueden sobrevivir y así, mientras muchos individuos son eliminados por selección natural, algunas variantes sobreviven y dan origen a otras.

Estas ideas básicas están bien documentadas hoy en día, apoyadas por una enorme evidencia biológica, química y fósil, y todos los científicos serios están completamente de acuerdo con ellas. Las diferencias entre la teoría clásica de la evolución y la nueva teoría emergente se centran en la cuestión de la *dinámica* de la evolución, los mecanismos a través de los cuales tienen lugar los cambios evolutivos.

El propio concepto de Darwin de las variaciones al azar se basaba en una premisa compartida por las visiones del siglo xix sobre la herencia.

Se daba por sentado que las características de un individuo representaban una «mezcla» de las de sus progenitores, contribuyendo ambos en partes más o menos iguales a dicha mezcla. Esto significaba que el descendiente de un progenitor con una variación al azar útil, heredaría sólo el 50 % de la nueva característica y podría traspasar sólo el 25 % de ésta a la próxima generación. Así, la nueva característica se diluiría rápidamente, con muy pocas posibilidades de establecerse a través de la selección natural.

El mismo Darwin reconocía que éste era un punto seriamente débil de su teoría, para el que carecía de respuesta.

Resulta irónico que la solución al problema de Darwin fuese descubierta por Gregor Mendel, un monje austríaco aficionado a la botánica, solamente unos años después de la publicación de la teoría de Darwin, pero que fuese ignorada en vida de Mendel y sacada de nuevo a la luz en el cambio de siglo, transcurridos muchos años desde su muerte. De sus cuidadosos experimentos con guisantes, Mendel dedujo que existían «unidades de herencia» (llamadas posteriormente genes) que no se mezclaban en el proceso de reproducción, sino que eran transmitidas de generación en generación sin cambiar su identidad. Con este descubrimiento se podía asumir que las mutaciones aleatorias de genes no desaparecerían en pocas generaciones, sino que serían preservadas, bien para salir reforzadas, bien para ser eliminadas por la selección natural.

El descubrimiento de Mendel no sólo desempeñó un papel decisivo en el establecimiento de la teoría darwiniana de la evolución, sino que abrió también todo un nuevo campo de investigación: el estudio de la herencia a través de la investigación de la naturaleza física y química de los genes.[1] El biólogo británico William Bateson, ferviente defensor y difusor del trabajo de Mendel, denominó a principios de siglo «genética» a este nuevo campo. Puso también el nombre de Gregory a su hijo menor, en honor a Mendel.

La combinación de la idea de Darwin de cambios evolutivos graduales con el descubrimiento de Mendel sobre la estabilidad genética, resultó en la síntesis conocida como neodarwinismo, que se enseña hoy como la teoría establecida de la evolución en los departamentos de biología de todo el mundo. Según la teoría neodarwinista, toda variación evolutiva es el resultado de una mutación aleatoria -es decir, de cambios genéticos aleatorios-, seguida de selección natural. Por ejemplo, si una especie animal necesita pelaje espeso para sobrevivir en un clima (río, no responderá a esta necesidad desarrollando pelaje, sino desarrollando toda clase de cambios genéticos aleatorios, por lo que los descendientes cuyos cambios hayan producido pelaje espeso, sobrevivirán y podrán reproducirse. De este modo y en palabras del genetista Jacques Monod, «únicamente el azar es la fuente de toda innovación, de toda creación en la biosfera».[2]

En opinión de Lynn Margulis, el neodarwinismo es fundamentalmente defectuoso, no sólo porque se basa en conceptos reduccionistas ya desfasados, sino también por estar formulado en

un lenguaje matemático inadecuado. «El lenguaje de la vida no es la aritmética y el álgebra ordinarios», argumenta Margulis, «sino la química. Los neodarwinistas en ejercicio carecen de un conocimiento suficiente de, por ejemplo, microbiología, biología celular, bioquímica... y ecología microbiana.»'

Una de las razones por las que los principales evolucionistas actuales carecen del adecuado lenguaje para la descripción del cambio evolutivo, según Margulis, es que la mayoría de ellos proviene de la tradición zoológica y, por tanto, están acostumbrados a tratar sólo con una pequeña y relativamente reciente parte de la historia de la evolución. La investigación actual en microbiología indica firmemente que las principales vías para la creatividad de la evolución se desarrollaron mucho antes de la aparición de los primeros animales.[4]

El principal problema conceptual de los neodarwinistas parece ser su concepción reduccionista del genoma, el conjunto de los genes de un organismo. Los grandes logros de la biología molecular, descritos frecuentemente como el «descifre del código genético», han originado en la tendencia a representar el genoma como una disposición lineal de genes independientes, cada uno correspondiente a un rasgo biológico.

La investigación ha demostrado, no obstante, que un solo gen puede afectar a un gran número de rasgos y que, por otra parte, muchos genes separados a menudo se combinan para producir un solo rasgo. Sigue siendo pues bastante misterioso cómo estructuras complejas como un ojo o una flor pudieron evolucionar a través de sucesivas mutaciones de genes individuales. Evidentemente, el estudio de las actividades de coordinación e integración de todo el genoma resulta de la máxima importancia, pero éste se ha visto seriamente obstaculizado por el aspecto mecanicista de la biología convencional. Sólo muy recientemente, los biólogos han empezado a entender el genoma de un organismo como una red altamente compleja y a estudiar sus actividades desde una perspectiva sistémica.[5]

LA VISIÓN SISTÉMICA DH. LA EVOLUCIÓN

Una sorprendente manifestación de la totalidad genética es el hecho, actualmente bien documentado, de que la evolución no se produjo a través de cambios graduales continuos en el tiempo, causados por largas secuencias de mutaciones sucesivas. El historial fósil demuestra claramente que a lo largo de la historia de la evolución ha habido largos períodos de estabilidad o «estasis» sin ninguna variación, puntuados por súbitas y dramaticas transiciones. Períodos estables de centenares de miles de años constituyen la norma general. En realidad, la aventura evolutiva humana empezó con un millón de años de estabilidad de la primera especie de homínido, el *Australopithecus afarensis*.[6] Esta nueva imagen, conocida como «equilibrios puntuados», indica que las transiciones súbitas fueron causadas por mecanismos muy distintos a las mutaciones aleatorias de la teoría neodarwinista.

Un aspecto importante de la teoría clásica de la evolución es la idea de que, en el curso del cambio evolutivo y bajo la presión de la selección natural, los organismos se adaptarán gradualmente a su entorno hasta alcanzar un ajuste suficientemente adecuado para sobrevivir y reproducirse. Bajo la nueva perspectiva sistémica, sin embargo, el cambio evolutivo es visto como el resultado de la tendencia inherente en la vida a crear novedad, que puede o no ir acompañada de adaptación a las condiciones medioambientales cambiantes.

Consecuentemente, los biólogos sistémicos han empezado a representar el genoma como una red autoorganizadora, capaz de producir espontáneamente nuevas formas de orden. «Debemos repensar la biología evolutiva», escribe Stuart Kauffman. «Gran parte del orden que percibimos en los organismos puede ser el resultado directo, no de la selección natural, sino del orden natural en que la selección ha prelerido actuar... La evolución no es sólo un remiendo... Es orden emergente, saludado y aguzado por la selección.»[7]

No ha sido aún formulada una nueva teoría general de la evolución basada en estas recientes revelaciones, pero los modelos y teorías de los sistemas autoorganizadores analizados en los capítulos precedentes, proveen los elementos para la formulación de dicha teoría.[8] La teoría de las estructuras disipativas de Prigogine demuestra cómo sistemas bioquímicos complejos, operando lejos del equilibrio, generan bucles catalíticos que conducen a inestabilidades que pueden generar nuevas estructuras de orden superior. Manfred Eigen ha sugerido que podrían haberse formado semejantes ciclos catalíticos antes de la aparición de la vida sobre la Tierra, iniciando así la fase prebiológica de la evolución. Stuart Kauffman ha utilizado las redes binarias como modelos matemáticos de las redes genéticas de los organismos

vivos, y ha podido deducir de dichos modelos diversas características conocidas de la división celular y de la evolución. Humberto Maturana y Francisco Varela han descrito los procesos de evolución en términos de su teoría de la autopoiesis, contemplando la historia evolutiva de las especies como el historial de su acoplamiento estructural. James Lovelock y Lynn Margulis han explorado en su teoría Gaia las dimensiones planetarias del despliegue de la vida.

La teoría Gaia, así como el trabajo previo de Lynn Margulis en microbiología, han puesto en evidencia la falacia del estrecho concepto darwinista de adaptación. A través del mundo viviente, la evolución no puede quedar limitada a la adaptación de los organismos al entorno, puesto que éste está moldeado por una red de sistemas vivos capaces de adaptación y creatividad. Así pues, ¿quién se adapta a quién? Unos a otros: *coevolucionan.* Como dijo James Lovelock:

> Tan íntimamente vinculada está la evolución de los organismos vivos con la evolución de su entorno, que juntos constituyen un único proceso evolutivo.[9]

De este modo, nuestra atención se está desplazando de la evolución a la coevolución; una continua danza que se desarrolla a través de la sutil interacción entre competición y cooperación, creación y adaptación mutua.

CAMINOS DE CREATIVIDAD

Así pues, según la emergente nueva teoría, debemos buscar la fuerza impulsora de la evolución, no en los acontecimientos azarosos de las mutaciones aleatorias, sino en la tendencia inherente en la vida a crear novedad, en la aparición espontánea de complejidad y orden crecientes. Una vez entendida esta nueva y fundamental percepción, podemos preguntar: ¿cuáles son los caminos por los que la creatividad de la evolución se expresa?

La respuesta a esta pregunta nos llega no sólo desde la biología molecular sino, aún más importante, desde la microbiología, a través del estudio de la red planetaria compuesta por miríadas de microorganismos que constituyeron las únicas formas de vida sobre la Tierra durante los primeros dos mil millones de años de evolución. Durante este tiempo, las bacterias transformaron continua-

mente la superficie y la atmósfera terrestres, y al hacerlo, inventaron lodas las biotecnologías esenciales para la vida incluyendo la fermentación, la fotosíntesis, la fijación del nitrógeno, la respiración y los dispositivos rotativos para el movimiento rápido.

Durante los últimos treinta años, la extensa investigación en microbiología ha desvelado tres grandes caminos de evolución.[10] El primero, aunque el menos importante, es la mutación aleatoria de genes que constituye la pieza central de la leoría neodarwinista. La mutación genética es causada por un error accidental en la autorreplicación del ADN, cuando dos cadenas de la doble helicoide del ADN se separan y cada una de ellas sirve como plantilla para la construcción de una nueva cadena complementaria."

Se estima que estos errores accidentales tienen lugar con una proporción de uno entre cada varios centenares de millones de células en cada generación. Esta frecuencia no parece suficiente para explicar la evolución de la gran diversidad de formas vivas, dado el bien conocido hecho de que la mayoría de mutaciones son dañinas y sólo algunas desembocan en variaciones útiles.

En el caso de las bacterias la situación es distinta, debido a la rapidez con que se dividen. Las bacterias rápidas pueden hacerlo aproximadamente cada veinte minutos de modo que, en principio, varios miles de millones de bacterias individuales pueden ser generadas desde una única célula en menos de un día.[12] Gracias a este trepidante ritmo de reproducción, una sola bacteria mutante con éxito puede extenderse rápidamente en su entorno, siendo electivamente la mutación un camino de evolución importante para las bacterias.

No obstante, las bacterias han desarrollado un segundo camino para la creatividad evolutiva que resulta infinitamente más efectivo que la mutación aleatoria. Se pasan unas a otras libremente rasgos hereditarios en una red global de intercambio de poder y eficiencia increíbles. Así es como Lynn Margulis y Dorion Sagan la describen:

> En los últimos cincuenta años, aproximadamente, los científicos han observado que [las bacterias] transfieren rápida y rutinariamente distintos bits de material genético a otros individuos. Cada bacteria dispone periódicamente del uso de genes accesorios, provenientes en ocasiones de muy diferentes linajes y que cubren funciones que quizás su propio ADN no podría desarrollar. Algunos de estos bits son recombinados con los

genes originales de la célula, otros vuelven a ser puestos en circulación... Como resultado de esta habilidad, todas las bacterias del mundo tienen acceso a un único banco de genes y por ende, a los mecanismos de adaptación de todo el reino bacteriano.[13]

Este intercambio global de genes, técnicamente conocido como recombinación del ADN, debe registrarse como uno de los más asombrosos descubrimientos de la biología moderna. «Si las propiedades genéticas del microcosmos se aplicasen a criaturas mayores, tendríamos un mundo de ciencia ficción», escriben Margulis y Sagan, «en el que las plantas verdes podrían compartir genes por fotosíntesis con los hongos vecinos, o donde la gente podría exudar perfumes o crear marfil, recogiendo genes de rosa o de morsa.»[14]

La celeridad con que la resistencia a los fármacos se propaga en las comunidades bacterianas es una prueba espectacular de que la eficiencia de su red de comunicaciones es infinitamente superior a la de la adaptación mediante mutaciones. Las bacterias son capaces de adaptarse a los cambios medioambientales en pocos años, mientras que organismos mayores necesitarían milenios de adaptación evolutiva. Así, la microbiología nos enseña la moderada lección de que tecnologías como la ingeniería genética y la globalización de las comunicaciones, que consideramos logros adelantados de nuestra civilización moderna, han sido utilizados por la red planetaria de bacterias durante miles de millones de años para regular el planeta.

El constante intercambio de genes entre las bacterias da lugar a una asombrosa variedad de estructuras genéticas además de su ramal principal de ADN. Éstas incluyen la formación de virus, que no son sistemas autopoiésicos completos, sino que consisten meramente en una tira de ADN o ARN en una funda proteica.[15] De hecho, el bacteriólogo canadiense Sorin Sonea ha argumentado que las bacterias, estrictamente hablando, no deberían ser clasificadas en especies, puesto que todos sus linajes pueden potencialmente compartir rasgos hereditarios y, típicamente, cambiar hasta un 15 % de su material genético en un día. «Una bacteria no es un organismo unicelular», escribe Sonea, «es una célula incompleta... que pertenece a diferentes quimeras según las circunstancias.»[16] En otras palabras, todas las bacterias son parte de una sola red microcósmica de vida.

La mutación y la recombinación de ADN (el intercambio de genes son los dos caminos principales de la evolución bacteriana, pero ¿qué pasa con los organismos multicelulares de todas las formas mayores de vida? Si las mutaciones aleatorias no son un mecanismo evolutivo efectivo para ellas y tampoco intercambian genes como las bacterias, ¿de qué modo han conseguido evolucionar las formas superiores de vida? Esta cuestión fue resuelta por Lynn Margulis con el descubrimiento de una tercera y totalmente inesperada vía de evolución, con prolundas implicaciones en todas las ramas de la biología.

Los microbiólogos conocían desde hacía algún tiempo que la división más fundamental entre todas las formas de vida no es la que separa animales de plantas, como comúnmente podríamos pensar, sino lo que establece entre dos clases de células: con y sin núcleo. Las bacterias -la forma más simple de vida- carecen de núcleo y reciben por ello el nombre de *prokaryotes* o procariontes («células no-nucleadas»), mientras que todas las otras células tienen núcleo y reciben el nombre de *eukaryotes* o eucariontes («células nucleadas»). Todas las células de los organismos superiores son nucleadas y las eucariontes también aparecen como microorganismos monocelulares no bacterianos.

En sus estudios de genética, Lynn Margulis quedó intrigada por el hecho de que no todos los genes de una célula nucleada se encuentren dentro del núcleo:

> Nos habían enseñado que los genes estaban dentro del núcleo y que éste era el control central de la célula. Pronto en mis estudios de genética me di cuenta de que existen otros sistemas genéticos con distintos patrones de herencia. Desde el principio, me sentí intrigada por estos genes irregulares que no estaban dentro del núcleo.[17]

Al profundizar en el estudio de este fenómeno, Margulis descubrió que casi todos los «genes irregulares» provenían de bacterias y, gradualmente, llegó a darse cuenta de que pertenecían a distintos organismos vivos, pequeñas células vivas residiendo dentro de células mayores.

La simbiosis, la tendencia de diferentes organismos a convivir en íntima asociaciém y a menudo unos dentro de otros (como las bacterias de nuestros intestinos), es un extendido y bien cono-

cido fenómeno, pero Margulis dio un paso más y propuso la hipótesis de que las simbiosis de larga duración, involucrando bacterias y otros microorganismos que viven dentro de células mayores, habrían dado y seguían dando origen a nuevas formas de vida. Margulis publicó su hipótesis revolucionaria por primera vez a mediados de los sesenta y con los años la desarrolló en una teoría completa conocida como «simbiogenesis», que contempla la creación de nuevas formas de vida a través de acuerdos simbióticos permanentes como el principal camino de evolución para los organismos superiores.

La más sorprendente evidencia de evolución mediante simbiosis la representan las llamadas mitocondrias, las «plantas generadoras de energía» del interior de la mayoría de las células nucleadas.[18] Estas partes vitales para toda célula animal o vegetal, que tienen a su cargo la respiración celular, contienen su propio material genético y se reproducen independientemente y en distinto momento del resto de la célula. Margulis especula que las mitocondrias fueron en tiempos pasados bacterias libres que invadieron a otros microorganismos, tomando residencia permanente en su interior. «Los organismos mezclados siguieron evolucionando en formas de vida más complejas, que respiraban oxígeno», explica Margulis. «Aquí tenemos pues un mecanismo evolutivo más rápido que la mutación: una alianza simbiótica que deviene permanente.»[19]

La teoría de la simbiogénesis implica un cambio radical de percepción en el pensamiento evolutivo. Donde la teoría convencional ve el despliegue de vida como un proceso en el que las especies meramente divergen entre sí, Lynn Margulis declara que la formación de nuevas entidades compuestas a través de la simbiosis de organismos anteriormente independientes ha sido la fuerza evolutiva más poderosa e importante.

Esta nueva visión ha obligado a los biólogos a reconocer la vital importancia de la cooperación en el proceso evolutivo. Mientras que los darwinistas sociales del siglo xix únicamente veían competencia en la naturaleza -«naturaleza, roja en dientes y garras», como decía el poeta Tennyson-, empezamos ahora a ver la cooperación continua y la mutua dependencia entre todas las formas de vida como los aspectos centrales de la evolución. En palabras de Margulis y Sagan: «La vida no conquistó el globo con combates, sino con alianzas.»[20]

El despliegue evolutivo de la vida a lo largo de miles de millones de años es una historia sobrecogedora. Movida por la creatividad inherente a todos los sistemas vivos, expresada por tres caminos distintos -mutaciones, intercambio de genes y simbiosis- y espoleada por la selección natural, la pátina viva del planeta se expandió e intensificó en formas de creciente diversidad. La historia está hermosamente contada por Lynn Margulis y Dorion Sagan en su libro *Microcosmos,* en el que las siguientes páginas están ampliamente inspiradas.[21]

No existe evidencia de ningún plan, objetivo o propósito en el proceso global evolutivo y, por lo tanto, tampoco la hay de progreso, pero aun así existen patrones de desarrollo reconocibles. Uno de ellos, conocido como convergencia, es la tendencia de los organismos a desarrollar formas similares para responder a desafíos parecidos, a pesar de tener historias ancestrales distintas. Así, los ojos han evolucionado en múltiples ocasiones por rutas distintas en gusanos, caracoles, insectos y vertebrados. De forma parecida, las alas evolucionaron independientemente en insectos, reptiles, murciélagos y pájaros. Parece que la creatividad de la naturaleza no tiene límites.

Otro patrón sorprendente es la repetida aparición de catástrofes -quizás puntos de bifurcación planetarios-, seguidas por intensos períodos de crecimiento e innovación. Así, la desastrosa reducción de hidrógeno en la atmósfera de la Tierra hace dos mil millones de años, condujo a una de las mayores innovaciones evolutivas: el uso del agua en la fotosíntesis. Millones de años después, esta nueva tecnología tremendamente exitosa provocó una crisis de polución catastrófica por acumulación de grandes cantidades de oxígeno tóxico. La crisis del oxígeno, a su vez, desencadenó la evolución de bacterias que respiraban oxígeno, otra de las espectaculares innovaciones de la vida. Más recientemente, hace doscientos cuarenta y cinco millones de años, las más devastadoras extinciones en masa jamás conocidas por el mundo fueron seguidas rápidamente por la evolución de los mamíferos, y hace sesenta y seis millones de años, la catástrofe que borró a los dinosaurios de la faz de la Tierra* dejó expedito el camino para la evolución de los primeros primates y, en su momento, de la especie humana.

* El autor se refiere aquí al posible impacto de un meteorito gigante, hipótesis que se basa en la práctica ausencia de cascaras de cocolitófora (alga marina microscópica) en los sedimentos que separan la creta depositada durante el período Cretáceo de la arenisca del Terciario. Este impacto podría haber causado reacciones en cadena a lo largo de varios millones de años, que habrían incluido erupciones volcánicas masivas, aumento del nivel de $C0_2$ y de 10° de temperatura, entre otras. Estas condiciones catastróficas debieron suponer una prueba terrible para muchas especies. Entre las que no

Para cartografiar el despliegue de la vida sobre la Tierra debemos utilizar una escala de tiempo geológica, en la que los períodos de tiempo se miden en miles de millones de años. Empieza con la formación del planeta Tierra, una bola de lava incandescente, hace aproximadamente cuatro mil millones de años. Los geólogos y paleontólogos han dividido este espacio de tiempo en numerosos períodos y subperíodos, etiquetados con nombres tales como «proterozoico», «paleozoico», «cretáceo» o «pleistoceno». Afortunadamente, no necesitamos recordar ninguno de estos términos técnicos para tener una idea de los principales estadios de la evolución de la vida.

Podemos distinguir tres grandes edades en la evolución de la vida sobre la Tierra, cada una de ellas abarca periodos de entre mil y dos mil millones de años y todas ellas poseen varios estadios distintos de evolución (ver tabla en página 245). La primera es la era prebiótíca, en la que se formaron las condiciones aptas para la aparición de vida. Pasaron mil mil lones de años desde la formación de la Tierra hasta la creación de las primeras células -el principio de la vida-, hace unos tres mil quinientos millones de años. La segunda edad, que abarca dos mil millones de años, es la del microcosmos, en la que las bacterias y otros microorganismos inventaron todos los procesos básicos para la vida y establecieron los bucles globales de retroalimentación necesarios para la autorregulación del sistema Gaia.

Mil quinientos millones de años atrás, la superficie y la atmósfera modernas de la Tierra estaban ya ampliamente establecidas, los microorganismos poblaban el suelo, el agua y el aire, circulando gases y nutrientes a través de su red planetaria tal como siguen haciendo hoy y el escenario estaba listo para la tercera edad de la vida, el macrocosmos, que presenciaría la evolución de las formas visibles de vida, entre las que nos contamos los humanos.

EL ORIGEN DE LA VIDA

Durante los primeros mil millones de años después de la formación de la Tierra, las condiciones adecuadas para la aparición

lograron superarla, cabría contar a los dinosaurios. Para más detalles, ver Lovelock, *GAIA, una ciencia para curar el planeta,* Integral, 1992, pp. 68-69 y 144-145. *(N. delT.)*

de la vida fueron encajando gradualmente. La primitiva bola de fuego era lo suficientemente grande para mantener una atmósfera y contenía los elementos químicos necesarios para que se pu-

Edades de la vida	Millones de años atrás	Etapas de la evolución
EDAD PREBIÓTICA Formación de las condiciones para la vida	**4.500**	Formación de la Tierra
		Enfriamiento de la bola de lava fundida
	4.000	Primeras rocas
		Condensación de vapor
	3.800	Océanos poco profundos
		Compuestos a base de carbono
		Bucles catalíticos, membranas
MICROCOSMOS Evolución de los microorganismos	**3.500**	Primeras células bacterianas
		Fermentación
		Fotosíntesis
		Dispositivos sensoriales, movimiento
		Reparación del ADN
		Intercambio de genes
	2.800	Placas tectónicas, continentes
		Fotosíntesis del oxígeno
	2.500	Extensión total de las bacterias
	2.200	Primeras células nucleadas
	2.000	Producción de oxígeno en la atmósfera
	1.800	Respiración de oxígeno
	1.500	Superficie y atmósfera terrestres establecidas
MACROCOSMOS Evolución de las formas visibles de vida	1.200	Locomoción
	1.000	Reproducción sexual
	800	Mitocondria, cloroplastos
	700	Primeros animales
	600	Cáscaras y esqueletos
	500	Primeras plantas
	400	Animales terrestres
	300	Dinosaurios
	200	Mamíferos
	100	Plantas floridas
		Primeros primates

diesen formar los compuestos químicos básicos indispensables para la vida. Su distancia del Sol era precisamente la justa: suficientemente lejos para un lento proceso de enfriamiento, pero suficientemente cerca para impedir la congelación perenne de sus gases.

Después de quinientos millones de años de enfriamiento gradual, el vapor que llenaba la atmósfera se condensó finalmente. A lo largo de miles de años cayeron lluvias torrenciales, que fueion acumulándose para formar océanos de poca profundidad. Durante este largo período de enfriamiento el carbono, pilar químico de la vida, se combiné) rápidamente con hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y fósforo, para generar una enorme variedad de compuestos químicos. Estos seis elementos -*C,* H, O, N, S, P- son en la actualidad los principales componentes de lodo organismo vivo.

Durante muchos años, la ciencia ha debatido la posibilidad de que la vida hubiese emergido del «caldo químico» que se formé) a medida que el planeta se enfriaba y los océanos se extendían. Varias teorías de sucesos desencadenantes, como la caída de un espectacular relámpago o la siembra de macromoléculas sobre la Tierra por meteoritos, competían entre sí. Otros científicos argumentaban que las probabilidades de tales sucesos parecen cada vez más pequeñas. No obstante, la reciente investigación sobre sistemas autoorganizadores pone de relieve que no es necesario postular ningún acontecimiento súbito.

Como señala Margulis: «Los elementos químicos no se combinan aleatoriamente, sino de modo ordenado y pautado.»[22] El medioambiente de la Tierra primitiva favorecía la formación de moléculas complejas, algunas de las cuales se convirtieron en catalizadores de diversas reacciones químicas. Estas se entrecruzaron gradualmente hasta formar complejas redes catalíticas que comprendían bucles de retroalimentación -primero ciclos, luego «hyperciclos»-, con una gran tendencia a la autoorganización e incluso a la autorreplicación.[23] Una vez alcanzado este estado, la dirección para la evolución prebiótica estaba marcada. Los ciclos catalíticos evolucionaron a estructuras disipativas y al pasar por sucesivas inestabilidades (puntos de bifurcación) generaron sistemas químicos de creciente riqueza y diversidad.

En su momento, estas estructuras disipativas empezaron a formar membranas, quizás provenientes primero de ácidos grasos sin proteínas, como las micelas recientemente producidas en laboratorio.[24] Margulis especula que diferentes tipos de sistemas

químicos autorreplicantes encerrados en membranas, pueden haber emergido, evolucionado por algún tiempo y luego desaparecido, antes de que surgiesen las primeras células: «Muchas estructuras disipativas, largas cadenas de distintas reacciones químicas deben haber evolucionado, reaccionado y fracasado, antes de que la elegante doble helicoide de nuestro antepasado definitivo se formase y replicase con gran exactitud.»[25] En aquel instante, hace hoy tres mil quinientos millones de años, nacieron las primeras células bacterianas autopoiésicas, empezando así la evolución de la vida.

TEJIENDO LA RED BACTERIANA

Las primeras células tuvieron una existencia precaria. El medioambiente cambiaba continuamente y cada acontecimiento representaba una nueva amenaza para su existencia. Frente a estas fuerzas hostiles -dura luz solar, impactos de meteoritos, erupciones volcánicas, sequías e inundaciones-, las bacterias debían captar energía, agua y alimento para mantenerse con vida. Cada crisis debe haber eliminado grandes extensiones de las manchas de vida sobre el planeta, sin conseguir no obstante eliminarlas por completo debido a dos rasgos vitales: la capacidad del ADN bacteriano para replicar fielmente y su extraordinaria rapidez en hacerlo. Gracias a sus cantidades ingentes las bacterias fueron capaces, una y otra vez, de responder creativamente a todas las amenazas y desarrollar una gran variedad de estrategias de adaptación. Consiguieron así expandirse gradualmente, primero en el agua y luego en las superficies de los sedimentos y del suelo.

Quizás la tarea más importante era desarrollar una variedad de caminos metabólicos para extraer alimento y energía del medio. Uno de los primeros inventos de las bacterias fue la fermentación, la descomposición de azúcares y su conversión en moléculas de ATP, los «transportes de energía» que aprovisionan todos los procesos celulares.[26] Esta innovación permitió a las bacterias lermentadoras vivir de los elementos químicos de la tierra, el barro y el agua, protegidas de la dura luz solar.

Algunas de las bacterias lermentadoras desarrollaron también la habilidad de absorber gas nitrógeno del aire y convertirlo en varios compuestos orgánicos. «Fijar» el nitrógeno -en otras palabras, capturarlo directamente del aire- requiere grandes cantidades de energía y resulta una proeza que, incluso hoy en día,

sólo unas pocas bacterias especiales son capaces de realizar. Puesto que el nitrógeno es un ingrediente de las proteínas en todas las células, todos los organismos vivos dependen para su supervivencia de las bacterias fijadoras de nitrógeno.

Al principio de la era de las bacterias, la fotosíntesis -«sin duda la innovación metabólica más importante de la historia de la vida sobre el planeta»-,[27] se convirtió en la fuente primaria de energía vital. Los primeros procesos de fotosíntesis fueron distintos de los empleados por las plantas actualmente. Utilizaban el sulfuro de hidrógeno -un gas vomitado por los volcanes- en lugar de agua como fuente de hidrógeno, lo combinaban con la luz del sol y con el CO_2 del aire para formar compuestos orgánicos, y no producían oxígeno.

A medida que el hierro y otros elementos reaccionaban con el agua, el gas de hidrógeno se desprendía y ascendía a la atmósfera, donde se descomponía en átomos de hidrógeno. Puesto que dicho gas es demasiado ligero para ser mantenido por la fuerza de la gravedad de la Tierra, todo el hidrógeno se hubiese perdido si el proceso descrito hubiese permanecido sin control, desapareciendo todos los océanos en unos mil millones de años. Afortunadamente intervino la vida. En las últimas etapas de la fotosíntesis, se emitía oxígeno libre al aire, al igual que hoy en día, combinándose parte de él con el ascendente gas de hidrógeno para formar agua, manteniendo así la humedad del planeta y evitando la evaporación de los océanos.[28]

No obstante, la continuada absorción de CO_2 de aire en el proceso de fotosíntesis causaba otro problema. Al principio de la era de las bacterias, el sol era un 25 % menos luminoso que en la actualidad y el CO_2 de la atmósfera era muy necesario como gas de invernadero para mantener las temperaturas del planeta en un ámbito confortable. Si la pérdida de CO_2 no hubiese sido compensada, la Tierra se habría helado y la precoz vida bacteriana se habría extinguido.

Esta trayectoria desastrosa se evitó gracias a las bacterias termentadoras, que podrían haber evolucionado con anterioridad al inicio de la fotosíntesis. En su proceso de producción de moléculas de ATP a partir de azúcares, las bacterias fermentadoras producían también metano y CO_2 como subproductos. Éstos eran liberados a la atmósfera donde restauraban el invernadero planetario. De este modo, la fermentación y la fotosíntesis se convirtieron en dos procesos mutuamente equilibradores en el primitivo sistema Gaia.

La luz del Sol que llegaba a través de la atmósfera primitiva contenía radiación ultravioleta abrasadora y las bacterias debían equilibrar su protección a la exposición con su necesidad de energía solar para la fotosíntesis. Esto dio origen a la evolución de numerosos mecanismos de detección y movimiento. Algunas bacterias emigraron a aguas ricas en sales que actuaban como filtros solares, otras se refugiaron en la arena, mientras que algunas desarrollaron pigmentos capaces de absorber los rayos mortíferos. Muchas construyeron enormes colonias -marañas de microbios en múltiples niveles-, donde las capas superiores perecían carbonizadas, protegiendo con sus cadáveres a las capas inferiores.[29]

Además de filtros protectores, las bacterias desarrollaron también mecanismos para reparar el ADN dañado por la radiación, evolucionando enzimas específicos para este propósito. Casi todos los organismos actuales poseen estas enzimas reparadoras, que constituyen otro invento perdurable del microcosmos.[30]

En lugar de utilizar su propio material genético para los procesos de reparación, las bacterias de medios densamente poblados, tomaban a menudo prestados fragmentos de ADN de sus vecinas. Esta técnica evolucionó gradualmente en el constante intercambio de genes que se convirtió en el atajo más efectivo para la evolución bacteriana. En las formas superiores de vida, la recombinación de genes de distintos individuos está asociada con la reproducción, pero en el mundo de las bacterias los dos fenómenos se producen separadamente. Las células bacterianas se reproducen asexualmente, pero intercambian genes continuamente. En palabras de Margulis y Sagan:

> Nosotros intercambiamos genes «verticalmente» -a través de generaciones-, mientras que las bacterias lo hacen «horizontalmente», directamente con sus vecinas de la misma generación. El resultado es que mientras que las bacterias, genéticamente fluidas, son funcionalmente inmortales, en los eucariontes el sexo está vinculado con la muerte.[31]

Debido al pequeño número de genes permanentes en una célula bacteriana -típicamente menos del 1% de los de una célula nucleada-, las bacterias necesitan trabajar en equipo. Diferentes especies cooperan y se ayudan mutuamente con material genético complementario. Grandes equipos formados por grupos de bacterias, pueden actuar con la coherencia de un organismo único, desarrollando tareas que ninguno de ellos podría realizar individualmente.

A finales de los primeros mil millones de años tras la aparición de la vida, la Tierra bullía con bacterias. Habían sido inventados millares de biotecnologías -la mayoría conocidas hoy-, y cooperando e intercambiando información genética continuamente, los microorganismos habían comenzado a regular las condiciones para la vida en todo el planeta, como siguen haciendo en la actualidad. De hecho, muchas de las bacterias existen li- en la temprana era del microcosmos han sobrevivido básicamente iguales hasta nuestros días.

Durante las subsiguientes etapas de la evolución, los microorganismos constituyeron alianzas y coevolucionaron con plantas y animales, y hoy en día nuestro entorno está tan entrelazado a las bacterias, que resulta imposible decir dónde acaba el mundo inanimado y empieza la vida. Tendemos a asociar a las bacterias con la enfermedad, pero son también vitales para la supervivencia de animales y plantas. «Bajo nuestras diferencias superficiales, somos todos comunidades andantes de bacterias», escriben Margulis y Sagan. «El mundo reverbera en un paisaje puntillista hecho de minúsculos seres vivos.»[32]

LA CRISIS DEL OXÍGENO

A medida que las bacterias se expandían y ocupaban todo el espacio disponible en las aguas, rocas y barro del planeta primitivo, sus necesidades energéticas condujeron a una severa escasez de hidrógeno. Los hidratos de carbono esenciales para toda vida son complicadas estructuras de átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno. Para construir estas estructuras, las bacterias fotosintetizadoras tomaban carbono y oxígeno del aire en forma de $C0_2$, al igual que las plantas actuales. El hidrógeno lo absorbían del aire en forma de hidrógeno gaseoso y del sulfuro de hidrógeno que borboteaba en los volcanes. Pero el ligero hidrógeno gaseoso seguía escapándose al espacio y el sulfuro de hidrógeno llegó a ser insuficiente.

El hidrógeno existe por supuesto en abundancia en el agua (H_20), pero los enlaces entre el hidrógeno y el oxígeno en las moléculas de agua son mucho más fuertes que los que unen los dos átomos de hidrógeno en el hidrógeno gaseoso (H,) o el sulfuro de hidrógeno (H_2S). Las bacterias fotosintetizadoras no eran capaces de romper estos fuertes enlaces hasta que una clase especial de bacterias verde-azuladas inventaron un nuevo

tipo de fotosíntesis que acabó para siempre con el problema del hidrógeno.

Las bacterias recién evolucionadas -las antepasadas de las actuales algas verdeazuladas- utilizaban luz solar de mayor energía (menor longitud de onda) para separar las moléculas de agua en sus componentes hidrógeno y oxígeno. Tomaban el hidrógeno para la construcción de azúcares y otros hidratos de carbono y emitían al aire el oxígeno sobrante. Esta extracción de hidrógeno del agua, uno de los recursos más abundantes en el planeta, constituyó un hito evolutivo extraordinario con implicaciones de largo alcance para el subsiguiente desarrollo de la vida, De hecho, Lynn Margulis está convencida de que «el advenimiento de la fotosíntesis del oxígeno fue el hecho singular que dio paso eventualmente a nuestro medioambiente moderno».[33]

Con su ilimitada fuente de hidrógeno, las nuevas bacterias tuvieron un éxito espectacular. Se expandieron rápidamente por la superficie de la Tierra, cubriendo rocas y arena con su película azul verdosa. Aún en nuestros días están por todas partes, creciendo en estanques y piscinas, en paredes húmedas y en cortinas de ducha, allí donde haya agua y luz solar.

No obstante, hubo que pagar un precio muy alto por este acontecimiento evolutivo. Como cualquier sistema vivo en rápida expansión, las bacterias verde-azuladas producían ingentes cantidades de residuos, que en su caso eran además altamente tóxicos. Se trataba del gas oxígeno emitido como subproducto del nuevo modelo de fotosíntesis basado en el agua. El oxígeno libre es tóxico porque reacciona fácilmente con la materia orgánica, produciendo los llamados radicales libres, extremadamente destructivos para los hidratos de carbono y otros compuestos bioquímicos esenciales. El oxígeno reacciona asimismo con facilidad con gases atmosféricos y metales, desencadenando combustión y corrosión, las dos formas más conocidas de «oxidación» (combinación con oxígeno).

Al principio la Tierra absorbía el oxígeno residual con facilidad. Habían suficientes metales y compuestos de azufre de origen tectónico y volcánico que capturaban rápidamente el oxígeno libre y le impedían acumularse en el aire, pero tras absorberlo durante millones de años, los metales y minerales oxidantes acabaron saturándose y el gas tóxico empezó a acumularse en la atmósfera.

Hace aproximadamente dos mil millones de años la polución por oxígeno derivó en una catástrofe de proporciones globales sin

precedentes. Numerosas especies fueron eliminadas por completo y toda la red bacteriana tuvo que reorganizarse totalmente para sobrevivir. Evolucionaron mecanismos y dispositivos de protección y adaptación y, finalmente, la crisis del oxígeno condujo a una de las mayores y más exitosas innovaciones en toda la historia de la vida:

> En una de las mayores argucias de todos los tiempos, las bacterias (verdea/.uladas) inventaron un sistema metabólico que *requería* la misma substancia que había sido un veneno mortal... La respiración de oxígeno es un ingenioso y eficiente modo de canalizar y explotar la reactividad del oxígeno. Es en esencia una combustión controlada, que descompone moléculas orgánicas y proporciona dióxido de carbono, agua y una gran cantidad de energía... El microcosmos hizo algo más que adaptarse: desarrolló una dínamo movida por oxígeno que cambió la vida y su hábitat terrestre para siempre.[34]

Con esta espectacular invención, las bacterias verde-azuladas tenían dos mecanismos complementarios a su disposición -la generación de oxígeno libre a través de la fotosíntesis y su absorción mediante la respiración- y podían en consecuencia iniciar la preparación de los bucles de retroalimentación que iban a regular a partir de entonces el contenido de oxígeno en la atmósfera, manteniendo así el delicado equilibrio que iba a permitir evolucionar a las nuevas formas de vida respiradoras de oxígeno.[35]

La proporción de oxígeno libre en la atmósfera se estabilizó en el 2 1 % , un valor determinado por su grado de inflamabilidad. Si descendía por debajo del 15 *%, nada* ardería, los organismos no podrían respirar y se asfixiarían. Si por el contrario ascendía más allá del 25 *%, todo* ardería. La combustión se produciría espontáneamente y los incendios arrasarían la superficie del planeta. En consecuencia, Gaia ha mantenido el oxígeno atmosférico al nivel más confortable para todos los animales y plantas durante millones de años. Se fue formando además una capa de ozono (moléculas formadas por tres átomos de oxígeno) en la parte superior de la atmósfera, que desde entonces protege la vida sobre la Tierra de la severidad de los rayos ultravioleta solares. El escenario estaba preparado para la evolución de formas mayores de vida -hongos, plantas y animales-, que iba a ocurrir en plazos relativamente cortos.

El primer paso hacia formas superiores de vida fue la aparición de la simbiosis como una nueva vía para la creatividad evolutiva. Esto ocurrió hace alrededor de dos mil millones de años y condujo a la evolución de las eucariontes («células nucleadas»), que se convirtieron en los componentes fundamentales de plantas y animales. Las células nucleadas son mucho mayores y más complejas que las bacterias. Mientras que la célula bacteriana contiene una sola hebra suelta de ADN flotando libremente en el fluido celular, el ADN de una eucarionte se encuentra apretadamente replegado dentro de cromosomas, confinados a su vez dentro de una membrana en el interior del núcleo de la célula. La cantidad de ADN de una eucarionte es varios cientos de veces superior a la correspondiente a una bacteria.

La otra sorprendente característica de la célula nucleada es su abundancia de orgánulos: pequeñas partes de la célula que utilizan oxígeno y desarrollan una serie de funciones altamente especializadas.[36] La repentina aparición de las células nucleadas en la historia de la evolución y el descubrimiento de que sus orgánulos son organismos distintos y autorreproductores, llevó a Lynn Margulis a la conclusión de que las células nucleadas habían evolucionado a través de una simbiosis de muchos años, la cohabitación permanente de varias bacterias y otros organismos.[37]

Los antepasados de las mitocondrias y otros orgánulos pueden haber sido perfectamente bacterias mal intencionadas que invadieron a células mayores y se reprodujeron en su interior. Muchas de las células invadidas habrían muerto, llevándose consigo a las invasoras. Sin embargo, algunos de los predadores no mataron a sus anfitriones, sino que empezaron a cooperar con ellos, hasta que la selección natural permitió sobrevivir y evolucionar únicamente a los cooperadores. Las membranas nucleares pueden haber evolucionado para proteger a las células genéticas del organismo anfitrión de los ataques del invasor.

Durante millones de años las relaciones de cooperación fueron cada vez más coordinadas y entretejidas, los orgánulos tuvieron descendencia bien adaptada a la vida en el interior de células mayores y éstas fueron cada vez más dependientes de sus inquilinos. Con el tiempo estas comunidades de bacterias se hicieron tan interdependientes que funcionaban como un solo organismo integrado:

> La vida había avanzado otro paso, más allá de la red de libre intercambio genético, a la sinergia de la simbiosis. Organismos separados se convirtieron en uno, creando nuevas totalidades que eran mayores que la suma de sus partes.[38]

El reconocimiento de la simbiosis como fuerza evolutiva mayor tiene implicaciones filosóficas profundas. Todos los organismos mayores, incluyéndonos a nosotros mismos, son testimonios de que las prácticas destructivas no funcionan a la larga. Al final, los agresores acaban por destruirse a sí mismos, dando paso a otros que saben cómo cooperar- y llevarse bien. La vida es mucho menos una lucha competitiva por la supervivencia que el triunfo de la cooperación y la creatividad. Efectivamente, desde la aparición de las primeras células nucleadas, la creación ha ido procediendo por disposiciones cada vez más intrincadas de cooperación y evolución.

La vía de la evolución por simbiosis permitió a las nuevas formas de vida utilizar una y otra vez biotecnologías bien probadas, en diferentes combinaciones. Por ejemplo, mientras que las bacterias obtienen su energía y alimento mediante una gran variedad de ingeniosos métodos, tan sólo una de sus numerosas invenciones metabólicas es utilizada por los animales: la respiración de oxígeno, especialidad de las mitocondrias.

Las mitocondrias están también presentes en las células vegetales, que además contienen los llamados cloroplastos, las «estaciones solares» verdes responsables de la fotosíntesis.[39] Estos orgánulos son notablemente parecidos a las bacterias verdeazuladas, las inventoras de la fotosíntesis del oxígeno que, con toda seguridad, son sus antepasados. Margulis especula que las bacterias invasoras debían ser comidas regularmente por otros microorganismos y que algunas de ellas debieron resistir los procesos de digestión de sus anfitrionas,[40] adaptándose a su nuevo medio y continuando su producción de energía a través de la fotosíntesis, de la que las células mayores pronto fueron dependientes.

Sus nuevas relaciones simbióticas daban a las células acceso al uso eficiente de la luz y del oxígeno y les brindaban también una tercera ventaja revolucionaria: la capacidad de movimiento. Mientras que los componentes de una célula bacteriana flotan suave y pasivamente en el fluido celular, los de una célula nucleada parecen moverse decididamente; el fluido celular circula y toda la célula puede expandirse y contraerse o moverse rápida-

mente como un lodo, como por ejemplo en el caso de las células sanguíneas.

Al igual que tantos otros procesos de vida, el movimiento rápido fue inventado por las bacterias. El miembro más rápido del microcosmos es una minúscula criatura con aspecto de cabello llamada *espiroqueta* («cabello rizado»), conocida también como la «bacteria sacacorchos», que se mueve rápidamente en espiral. Al adherirse simbióticamente a células mayores, la rápida bacteria sacacorchos les proporcionó las tremendas ventajas del movimiento: la capacidad de evitar el peligro y de ir en busca de alimento. Con el tiempo, las bacterias sacacorchos fueron perdiendo sus rasgos más singulares para evolucionar hasta los bien conocidos «latiguillos celulares» *-flagelos, cilios* y demás-, que propulsan a una gran variedad de células nucleadas con ondulantes o bruscos movimientos.

Las ventajas combinadas de los tres tipos de simbiosis descritos en los párrafos anteriores, crearon una explosión de actividad evolutiva que generó una tremenda diversidad de células eucariontes. Con sus dos eficientes medios de producción de energía y su espectacular aumento de movilidad, las nuevas formas simbióticas de vida emigraron a nuevos hábitats, dando paso a las plantas y animales primitivos que, a su debido tiempo, abandonarían el agua para tomar posesión de la tierra firme.

Como hipótesis científica, el concepto de simbiogenesis -la creación de nuevas formas de vida mediante la combinación de distintas especies- tiene apenas treinta años de antigüedad, pero como mito cultural, la idea parece ser tan antigua como la humanidad misma.[41] La épica religiosa, las leyendas, los cuentos de hadas y otras historias míticas de todo el mundo están llenas de criaturas fantásticas -esfinges, sirenas, grifones, centauros y demás- nacidas de la unión de dos o más especies. Al igual que las nuevas células eucariontes, estas criaturas están formadas por componentes conocidos, pero en combinaciones novedosas y sorprendentes.

Las descripciones de estos seres híbridos son a menudo espeluznantes, pero muchos de ellos son vistos curiosamente como portadores de buena suerte. El dios Ganesha, por ejemplo, con cuerpo humano y cabeza de elefante, es una de las deidades más reverenciadas de la India, a la que se adora como símbolo de buena suerte y ayuda en momentos de dificultad. De algún modo la consciencia colectiva humana parece haber conocido desde antiguo que las simbiosis de larga duración son profundamente beneficiosas para la vida.

La evolución de las plantas y de los animales desde el microcosmos se produjo a través de una sucesión de simbiosis, en la que las invenciones bacterianas de los precedentes dos mil millones de años fueron combinadas en infinidad de expresiones de creatividad, hasta seleccionar formas viables para la supervivencia. Este proceso evolutivo se caracteriza por una creciente especialización: desde los orgánulos en las primeras eucariontes, hasta las células altamente especializadas de los animales.

Un aspecto importante de la especialización celular es la invención de la reproducción sexual, que ocurrió hace alrededor de mil millones de años. Tendemos a pensar que sexo y reproducción están en relación directa, pero Margulis señala que la compleja danza de la reproducción sexual consta de diferentes elementos aislados que evolucionaron independientemente y sólo gradualmente se entremezclaron y unificaron.[42]

El primer componente es un tipo determinado de división celular, denominado *meiosis* («disminución»), en el que el número de cromosomas en el núcleo queda reducido exactamente a la mitad. Esto crea células especializadas en forma de huevos y esperma. Estas células se funden más tarde en el acto de la fertilización, en el que se restaura el número normal de cromosomas y se crea una nueva célula: el huevo fertilizado. Esta célula se divide entonces repetidamente en el proceso de creación y desarrollo de un organismo multicelular.

La fusión de material genético de dos células distintas está ampliamente extendida entre las bacterias, donde tiene lugar en forma de intercambio continuo de genes no vinculado a la reproducción. En los primeros animales y plantas, se unieron la reproducción y la fusión de genes, lo que derivó en complicados procesos y rituales de fertilización. El género fue un refinamiento posterior. Las primeras células germinativas -huevos y esperma- eran prácticamente idénticas, pero con el tiempo evolucionaron en. rápidas y pequeñas células de esperma y grandes y estáticos huevos. La conexión de la fertilización con la formación de embriones llegó aún más tarde en la evolución de los animales. En el reino de las plantas, la fertilización condujo a intrincados patrones de coevolución de flores, insectos y pájaros.

A medida que continuaba la especialización de las células en formas de vida cada vez más grandes y complejas, la capacidad de autorreparación y regeneración disminuía progresivamente.

Los platelmintos, los pólipos *y* las estrellas de mar pueden regenerar la práctica totalidad de sus cuerpos a partir de pequeñas fracciones de los mismos; los lagartos, las salamandras, los cangrejos, las langostas y muchos insectos, pueden regenerar órganos y miembros perdidos. Pero en los animales superiores, la regeneración queda limitada a la renovación de tejidos en la curación de heridas. Como consecuencia de esta pérdida de capacidades regenerativas, todos los organismos grandes envejecen y mueren. No obstante, con la reproducción sexual la vida ha inventado un nuevo proceso regenerativo, en el que organismos completos se forman una y otra vez, volviendo a partir en cada «generación» de una única célula nucleada.

Plantas y animales no son las únicas criaturas multicelulares en el mundo vivo. Como muchos otros rasgos de los organismos vivos, la multicelularidad dio origen muchas veces a múltiples linajes de vida y existen aún hoy diversas clases de bacterias multicelulares y muchas protistas (microorganismos con células nucleadas) multicelulares. Al igual que los animales y las plantas, la mayoría de estos organismos multicelulares están formados por sucesivas divisiones celulares, aunque algunos pueden ser generados también por la agregación de células de diferentes procedencias pero de la misma especie.

Un espectacular ejemplo de estas agregaciones lo constituye el moho del limo, un organismo macroscópico pero que es técnicamente un protista. El moho del limo tiene un complejo ciclo vital, que comprende una fase móvil (animal) y otra inmóvil (vegetal). En su fase animal empieza como una multitud de células independientes, comúnmente halladas en los bosques bajo troncos en putrefacción y hojas húmedas, donde se alimentan de otros microorganismos y de la vegetación en descomposición. Las células a menudo comen tanto y se dividen tan rápidamente, que acaban con todo el alimento disponible a su alrededor. Cuando esto ocurre, se agregan en una masa cohesiva de miles de células parecida a una babosa capaz de desplazarse por el suelo del bosque con movimientos de ameba. Al encontrar una nueva fuente de alimento, la masa entra en su lase vegetal, desarrollando un troncho con un cuerpo de fruto muy parecido a un hongo. Finalmente la cápsula del fruto estalla, liberando miles de esporas secas de la que nacerán nuevas células, que se moverán independientemente a la búsqueda de alimento, iniciando así un nuevo ciclo de vida.

De entre las múltiples organizaciones multicelulares que evolucionaron desde cohesionadas comunidades de microorganis-

mos, tres -plantas, hongos y animales- han tenido tanto éxito en reproducirse, diversificarse y expandirse sobre la Tierra, que han sido clasificadas por los biólogos como «reinos», la más amplia categoría de organismos vivos. Existen en total cinco de estos reínos: bacterias (microorganismos sin células nucleadas), prolistas (microorganismos con células nucleadas), plantas, hongos y animales.[43] Cada reino está dividido en una jerarquía de subeategorías o *laxa,* empezando por *phylum* y acabando *por genus y species.*

La teoría de la simbiogenesis ha permitido a Lynn Margulis y sus colegas basar la clasificación de los organismos vivos en claras relaciones evolutivas. La figura 10-1 muestra de forma simplificada cómo protistas, plantas, hongos y animales han evolucionado desde las bacterias a través de una serie de simbiosis sucesivas, descritas con mayor detalle en las páginas siguientes.

Cuando seguimos la evolución de las plantas y los animales, nos encontramos a nosotros mismos en el macrocosmos y debemos cambiar nuestra escala de tiempo de miles de millones a millones de años. Los primeros animales evolucionaron hace unos setecientos millones de años y las primeras plantas aparecieron unos doscientos millones de años después. Ambos evolucionaron primero en el agua para salir a tierra firme entre cuatrocientos y cuatrocientos cincuenta millones de años atrás, precediendo las plantas a los animales en varios millones de años. Tanto plantas como animales desarrollaron grandes organismos multicelulares, pero mientras que la comunicación intercelular es mínima en las plantas, las células de los animales están altamente especializadas y estrechamente interconectadas por una gran variedad de complicados vínculos. Su coordinación y control mutuos se vieron fuertemente incrementados con la temprana creación de sistemas nerviosos, evolucionando los primeros pequeños cerebros animales hace unos seiscientos veinte millones de años atrás.

Los antepasados de las plantas eran tupidas masas de algas que medraban en aguas poco profundas bien iluminadas. Ocasionalmente sus habitatis de secaron y algunas algas consiguieron sobrevivir, reproducirse y convertirse en plantas. Estas plantas primitivas, muy parecidamente a los musgos actuales, carecían de tallos y hojas. Para sobrevivir sobre el suelo, era crucial que desarrollasen estructuras sólidas que les impediesen derrumbarse y secarse. Lo consiguieron creando lignina, un material para las paredes celulares que permitió a las plantas desarrollar tallos y ramas sólidos, así como sistemas vasculares con los que aspirar el agua desde sus raíces.

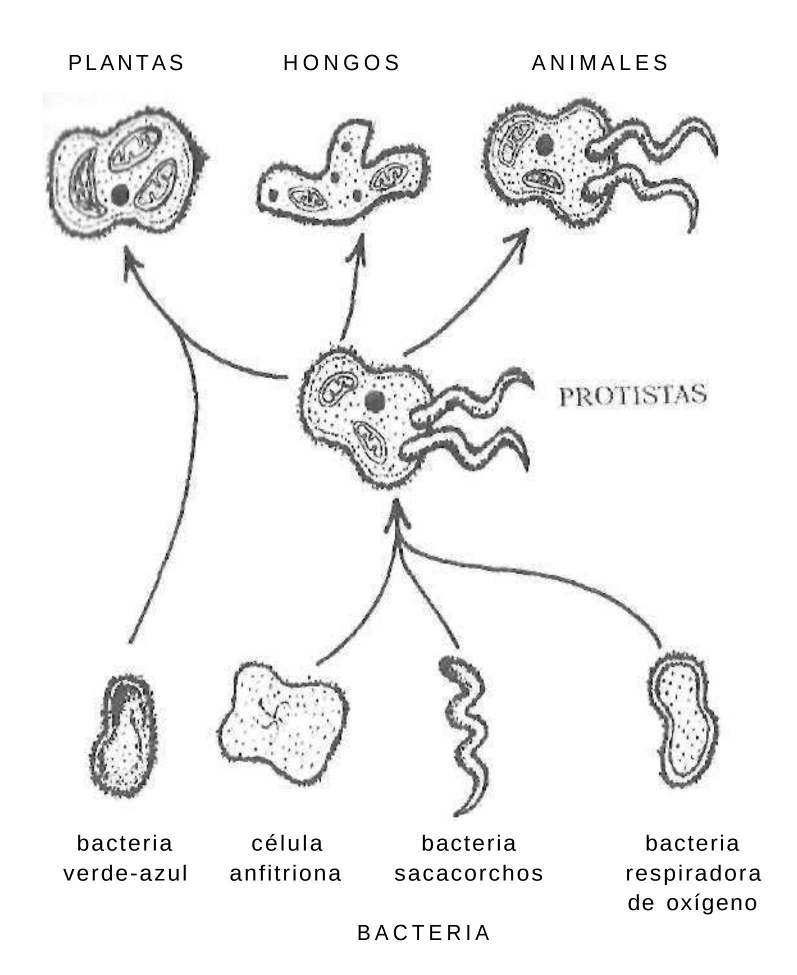


Figura 10-1
Relaciones evolutivas entre los cinco reinos de la vida.

El mayor reto del nuevo habitat en tierra firme era sin duda la escasez de agua. La respuesta creativa de las plantas fue encerrar sus embriones en semillas protectoras resistentes a la sequía, de modo que pudiesen esperar para su desarrollo hasta encontrarse en un ambiente adecuadamente húmedo. Durante cien millones de años, mientras los primeros animales (los anfibios) evolucionaban en forma de reptiles y dinosaurios, tupidos bosques de «helechos de semillas» -árboles portadores de semillas parecidos a helechos gigantes- cubrían grandes extensiones de la Tierra.

Doscientos millones de años atrás aparecieron los glaciares

en varios continentes y los bosques de helechos gigantes no pudieron sobrevivir a los largos y fríos inviernos. Fueron reemplazados por coniferas de hoja perenne semejantes a nuestros abetos y piceas, cuya mayor resistencia al frío les permitió soportar los inviernos e incluso expandirse en regiones alpinas más elevadas. Cíen millones de años más tarde empezarían a aparecer floridas plantas cuyas semillas estarían envueltas en frutos.

Desde el principio, estas plantas coevolucionaron con animales que disfrutaban de los nutrientes frutos, diseminando a cambio las semillas sin digerir. Estos acuerdos de cooperación han continuado desarrollándose, hasta llegar en la actualidad a incluir cultivadores humanos que no sólo siembran semillas, sino que clonan también plantas sin semillas para obtener sus frutos. Como observan Margulis y Sagan: «Las plantas parecen ciertamente muy aficionadas a seducir a los animales, habiendo llegado incluso a convencernos para que hagamos por ellas lo único que no pueden hacer: moverse.»[44]

CONQUISTANDO EL TERRITORIO

Los primeros animales evolucionaron en el agua desde masas de células globulares y gusaniformes. Eran aún muy pequeños, pero algunos de ellos constituyeron comunidades que construyeron colectivamente enormes arrecifes coralinos con sus depósitos de calcio. Al carecer de partes duras o esqueletos integrales, los animales primitivos se desintegraban por completo tras su muerte, pero cien millones de años más tarde, sus descendientes producían ya una gran variedad de exquisitas cáscaras y esqueletos que dejaron claras huellas en fósiles bien conservados.

Para los animales, la adaptación a la vida en tierra firme constituyó una proeza evolutiva de enormes proporciones, que requirió drásticos cambios en todos los sistemas de órganos. El mayor problema fuera del agua era, por supuesto, la desecación; pero había multitud de otras dificultades. Había muchísimo más oxígeno en la atmósfera que en los océanos, lo que requería diferentes órganos de respiración; hacían falta otros tipos de piel para protegerse de la luz solar no filtrada y eran precisos huesos más resistentes y músculos más poderosos para hacer frente a la fuerza de la gravedad en la ausencia de flotación.

Para facilitar la transición a este entorno completamente nuevo, los animales inventaron una ingeniosa argucia: se llevaron

con ellos su medio anterior para su descendencia. Hasta nuestros días, la matriz animal simula la humedad, flotabilidad y salinidad del antiguo medio marino. Más aún, las concentraciones de sal en la sangre y otros fluidos corporales de los mamíferos son notablemente parecidas a la de los océanos. Salimos de las aguas oceánicas hace más de cuatrocientos millones de años, pero nunca hemos dejado atrás el agua de mar; sigue estando en nuestra sangre, nuestro sudor y nuestras lágrimas.

Otra innovación capital que se convirtió en crucial para vivir en tierra firme tenía relación con la regulación del calcio. Éste desempeña un papel principal en el metabolismo de todas las células nucleadas, siendo especialmente crucial en la operación de los músculos. Para que estos procesos metabólicos funcionen, es preciso que la cantidad de calcio sea mantenida en unos niveles precisos, mucho menores que los del calcio en el agua de mar. En consecuencia, los animales marinos desde el principio debían eliminar continuamente los excesos de calcio. Los primeros animales pequeños simplemente lo excretaban, amontonándolo en ocasiones en forma de enormes arreciles coralinos. Al evolucionar animales mayores, empezaron a almacenar el exceso de calcio dentro y fuera de sí mismos, dando así origen a conchas y esqueletos.

Al igual que las bacterias verde-azuladas transformaron un agente tóxico contaminante -el oxígeno- en un ingrediente vital para su posterior evolución, los primeros animales transformaron otro contaminante importante el calcio- en material de construcción para nuevas estructuras que les proporcionaban tremendas ventajas. Cáscaras y otras partes duras servían para rehuir a los depredadores, mientras que los esqueletos, que surgieron primero en los peces, evolucionaron en las estructuras de soporte esenciales para todos los animales grandes.

Hace unos quinientos ochenta millones de años, al principio del llamado período Cámbrico, se depositó tal profusión de fósiles con bellas y claras huellas de cáscaras, cubiertas rígidas y esqueletos, que los paleontólogos creyeron durante mucho tiempo que dichos fósiles marcaban el inicio de la vida. En ocasiones eran incluso vistos como las huellas de los primeros actos divinos de creación. Sólo en los últimos treinta años se han revelado las huellas del microcosmos anterior gracias a los llamados fósiles químicos.[45] Éstos demuestran irrefutablemente que los orígenes de la vida preceden al período Cámbrico al menos en tres mil millones de años.

Los experimentos evolutivos con los depósitos de calcio condujeron a una gran variedad de formas: animales tubulares con columna vertebral pero sin huesos, criaturas en forma de pez con armaduras externas pero sin mandíbulas, peces-pulmón capaces de respirar tanto agua como aire y muchos más. Las primeras criaturas vertebradas con espinazos y caja craneal que protegía su sistema nervioso, probablemente evolucionaron hace unos quinientos millones de años. Entre ellos estaba una estirpe de pez dotado de pulmones, aletas regordetas, mandíbulas y cabeza de rana, que se arrastraba por las orillas y cuya evolución daría origen eventualmente a los primeros anfibios. Éstos -ranas, sapos, salamandras y tritones- constituyen el vínculo evolutivo entre los animales marinos y terrestres. Fueron los primeros vertebrados terrestres, pero hoy aún empiezan sus ciclos vitales como renacuajos que respiran agua.

Los primeros insectos salieron del agua aproximadamente al mismo tiempo que los anfibios, pudiendo incluso haber animado a algunos peces a seguirles fuera del agua para preciar sobre ellos. Una vez en tierra firme, los insectos explosionaron en una enorme variedad de especies. Su tamaño reducido y sus altos niveles de reproducción les permitieron adaptarse a casi todos los entornos y desarrollar una fabulosa diversidad de estructuras corporales y modos de vida. Existen en la actualidad cerca de 750.000 especies conocidas de insectos, tres veces más que la suma de todas las restantes especies animales.

Durante los ciento cincuenta millones de años posteriores al abandono del mar, los anfibios se convirtieron en reptiles dotados de grandes ventajas selectivas: mandíbulas poderosas, piel resistente a la sequedad y, aún más importante, una nueva clase de huevos. Como harían más tarde los mamíferos en sus úteros, los reptiles encapsularon el medio marino anterior dentro de grandes huevos, en los que sus descendientes podían prepararse plenamente para pasar todo su ciclo vital en tierra. Pertrechados con estas innovaciones, los reptiles conquistaron rápidamente la tierra y se desarrollaron en numerosas variedades. Los muchos tipos de lagartos existentes aún en la actualidad, incluyendo las serpientes sin extremidades, son descendientes de aquellos antiguos reptiles.

Mientras que la estirpe de los peces se arrastraba fuera del agua y se convertía en anfibios, los arbustos y los árboles medraban ya sobre la tierra, y cuando los anfibios dieron paso a los reptiles, vivieron en exuberantes selvas tropicales. Al mismo tiempo

Evolución de plantas y animales

Millones de años atrás	Etapas de evolución
700	primeros animales
620	primeros cerebros de animales
580	cáscaras y esqueletos
500	vertebrados
450	salida a tierra firme de las plantas
400	salida a tierra firme de anfibios e insectos
350	helechos de semillas
300	hongos
250	reptiles
225	coniferas, dinosaurios
200	mamíferos
150	pájaros
125	plantas floridas
70	extinción de los dinosaurios
65	primeros primates
35	monos
20	simios
10	grandes simios
4	simios del Sur erectos

los hongos, un tercer tipo de organismo multicelular, también había desembarcado. Los hongos parecen plantas pero son tan completamente distintos de éstas que están clasificados en un reino propio, que exhibe una serie de fascinantes propiedades.[46] Carecen de la verde clorofila necesaria para la fotosíntesis y no comen ni digieren, sino que absorben directamente sus nutrientes en forma de compuestos químicos. A diferencia de las plantas, los hongos no disponen de sistemas vasculares para formar raíces, tallos y hojas. Tienen muchas células distintivas que pueden contener varios núcleos y que están separadas por finas paredes a través de las cuales el fluido celular puede circular con facilidad.

Los hongos emergieron hace más de trescientos millones de años y se extendieron en íntima coevolución con las plantas.

Prácticamente todas las plantas que crecen en el suelo dependen de un diminuto hongo en sus raíces para la absorción de nitrógeno. Las raíces de los árboles de un bosque están interconectadas por una inmensa red de hongos que ocasionalmente emerge a la superficie en forma de setas. Sin hongos, no hubiesen podido existir las primitivas selvas tropicales.

Treinta millones de años después de la aparición de los primeros reptiles, una de sus estirpes se convirtió en dinosaurios (un término griego que significa «lagarto terrible»), que parecen ejercer una fascinación sin límites en los humanos de todos los tiempos. Existieron en gran variedad de tamaños y formas. Algunos tenían armaduras y picos córneos como las tortugas actuales, Otros cuernos. Algunos eran herbívoros, otros carnívoros. Como los restantes reptiles, los dinosaurios eran ovíparos. Muchos de ellos construían nidos, algunos llegaron a desarrollar alas y con el tiempo, hace unos cíenlo cincuenta millones de años, se convirtieron en pájaros.

En la época de los dinosaurios, la expansión de los reptiles estaba en pleno auge. Mares y tierras estaban poblados por serpientes terrestres y marinas, lagartos, tortugas de mar y varias especies de dinosaurios. Hace unos setenta millones de años, lodos los dinosaurios y muchas olías especies desaparecieron súbitamente, presumiblemente debido al impacto de un meteorito gigantesco, de más de once kilómetros de diámetro. La explosión catastrófica generó una enorme nube de polvo que bloqueó la luz del sol durante un largo período, cambiando drásticamente los patrones climáticos en lodo el globo, cambios a los que los dinosaurios no lograron sobrevivir.

EL CUIDADO DE LA PROGENIE

Hace unos doscientos millones de años, un vertebrado de sangre caliente evolucionó de los reptiles y se diversificó en una nueva clase de animales que con el tiempo darían paso a nuestros antepasados los primates. Las hembras de estos animales de sangre caliente ya no encerraban a sus embriones en huevos, sino que los nutrían en el seno de sus propios cuerpos. Tras el nacimiento, las crías eran relativamente incapaces y debían ser criadas por sus madres. Debido a este peculiar comportamiento, que incluye la alimentación con leche segregada por las glándulas mamarias de la madre, esta clase de animales se conoce con el nombre de

«mamíferos». Unos cincuenta millones de años después, otra estirpe de vertebrados de sangre caliente, los recientemente evolucionados pájaros, empezaría también a alimentar y enseñar a sus vulnerables crías.

Los primeros mamíferos eran pequeñas criaturas nocturnas. Mientras que los reptiles, incapaces de regular su temperatura corporal, permanecían inactivos durante las frías noches, los mamíferos desarrollaron la capacidad de mantener sus cuerpos calientes a niveles relativamente constantes con independencia de su entorno, permaneciendo así alerta y activos por la noche. Transformaron también parte de sus células cutáneas en pelo, lo que les aislaba aún más y les permitió emigrar de los trópicos a climas más fríos.

Los primates primitivos conocidos como prosimios («premonos») evolucionaron en los trópicos, hace unos sesenta y cinco millones de años, de mamíferos nocturnos comedores de insectos que vivían en árboles y tenían un aspecto parecido al de las ardillas. Los prosimios de nuestros días son pequeños animales de bosque, mayoritariamenlc nocturnos, que siguen viviendo en los árboles. Para saltar de rama en rama por la noche, estos primeros moradores de los árboles y comedores de insectos desarrollaron una aguda visión y en algunas especies, los ojos se fueron desplazando gradualmente hasta adoptar una posición fronlal, lo que era crucial para el desarrollo de la visión tridimensional, una venlaja decisiva para evaluar distancias entre los árboles. Otras características bien conocidas de los primales que evolucionaron de su habilidad para trepar, fueron manos y pies prensiles, uñas planas, pulgares opuestos y grandes dedos en los pies.

A diferencia de otros animales, los prosimios no estaban anatómicamente especializados y en consecuencia estaban constantemente amenazados por enemigos. No obstante, compensaron su falta de especialización desarrollando mayor destreza e inteligencia. Su temor a los enemigos, su constante correr y esconderse v su activa vida nocturna les llevaron a la cooperación y les condujeron al comportamiento social que es característico de todos los primates superiores. Además, el hábito de protegerse emitiendo frecuentes sonidos fuertes evolucionó gradualmente en comunicación vocal.

La mayoría de primates son comedores de insectos o vegetarianos que se alimentan de nueces, frutos y hierbas. En épocas de escasez de frutos o nueces, los antiguos primates habrían abandonado la protección de las ramas y descendido al suelo. Vigilan-

do ansiosamente la presencia de algún enemigo por encima de las altas hierbas, habrían adoptado por breves instantes una posición vertical antes de volverse a agazapar, como siguen haciendo hoy en día los mandriles. Esta habilidad para mantenerse erguidos, aunque fuese sólo durante unos instantes, representaba una fuerte ventaja selectiva, ya que les permitía usar sus manos para coger alimentos, blandir palos o arrojar piedras para defenderse. Gradualmente sus pies se aplanaron, su habilidad manual aumentó y el uso de armas e instrumentos primitivos estimuló el crecimiento de su cerebro, hasta que algunos prosimios se convirtieron en monos y simios.

La línea evolutiva de los monos divergió de la de los prosimios hace aproximadamente treinta y cinco millones de años. Los monos son animales diurnos, generalmente con caras más planas y expresivas que las de los prosimios y andan o corren normalmente sobre sus cuatro patas. Hace unos veinte millones de años, la línea de los simios se separó de la de los monos y diez millones de años después aparecían nuestros antepasados inmediatos, los grandes simios: orangutanes, gorilas y chimpancés.

Todos los simios son habitantes de bosques y la mayoría pasan al menos parte de su tiempo en los árboles. Los gorilas y los chimpancés son los más terrestres de los simios, desplazándose a cuatro patas sobre sus nudillos, es decir, apoyándose en los nudillos de sus extremidades delanteras. La mayoría de simios pueden también recorrer cortas distancias sobre sus extremidades posteriores. Al igual que los humanos, los simios poseen pechos anchos y planos y brazos capaces de girar sobre el hombro hacia adelante y hacia atrás. Esto les permite moverse entre los árboles balanceándose de rama en rama con un brazo y después con el otro, una proeza de la que los monos no son capaces. El cerebro de los grandes simios es mucho más complejo que el de los monos y en consecuencia su inteligencia es muy superior. La habilidad para utilizar e incluso hasta un cierto límite fabricar herramientas es una característica de los grandes simios.

Hace unos cuatro millones de años una especie de chimpancés del trópico africano evolucionó hasta dar paso al simio erecto. Esta especie de primates, que se extinguiría un millón de años después, era muy parecida a los otros grandes simios, pero debido a su modo de andar erguido ha sido clasificado como «homínido» lo que, según Lynn Margulis, está totalmente injustificado en términos puramente biológicos:

> Unos alumnos objetivos, si fuesen ballenas o delfines, colocarían a humanos, chimpancés y orangutanes en el mismo grupo taxonómico. No existe base fisiológica para clasificar a los humanos en una familia propia (...). Los seres humanos y los chimpancés son más parecidos que cualquier par de géneros de escarabajos escogidos al azar. En cambio, los animales que andan en posición erguida con sus manos balanceándose a los costados, son grandilocuentemente definidos como homínidos (...), no como simios.[47]

LA AVENTURA HUMANA

Tras haber seguido el desplegar de la vida desde sus mismos inicios, no podemos evitar experimentar una especial emoción cuando llegamos a la etapa en la que los primeros simios se irguieron y andaron sobre dos patas, incluso si esta emoción no está científicamente justificada. A medida que veíamos cómo los reptiles evolucionaban hasta convertirse en vertebrados de sangre caliente que cuidaban de sus crías, cómo los primeros primates desarrollaban uñas planas, pulgares opuestos y los inicios de la comunicación vocal y cómo los simios exhibían tórax y brazos parecidos a los humanos, cerebros complejos y la capacidad de construir herramientas, podemos percibir la gradual aparición de nuestras características humanas, y cuando llegamos al estadio de los simios andando erguidos y con sus manos libres, sentimos que el inicio de la aventura evolutiva humana es inminente. Para seguirla de cerca debemos cambiar de nuevo de escala, esta vez de millones a miles de años.

Los simios erectos, que se extinguieron hace aproximadamente un millón cuatrocientos mil años, pertenecían en su totalidad al género de los *Australopithecus.* El nombre, derivado del latín *australis* («del Sur») y del griego *pithekos* («simio»), significa «simio del Sur» y constituye un tributo a los primeros descubrimientos en Sudáfrica de fósiles pertenecientes a este género. La especie más antigua de estos simios del Sur se conoce como *Australopithecus afarensis,* llamada así por sus fósiles hallados en la región etíope de Afar y que incluyen el famoso esqueleto «Lucy». Eran primates de complexión menuda, quizás de un metro y medio de altura y probablemente tan inteligentes como los chimpancés actuales.

Tras casi un millón de años de estabilidad genética, entre dos o tres millones de años atrás, la primera especie de simios del Sur

La evolución humana

Años atrás	Etapas de la evolución
4 millones	*Australopithecus afarensis*
3,2 millones	«Lucy» *(Australopithecus afarensis)*
2,5 millones	varias especies *de Australopithecus*
2 millones	*Homo habilis*
1,6 millones	*Homo erectus*
1,4 millones	extinción de los *Australopithecus*
1 millón	el *Homo erectus* se instala en Asia
400.000	el *Homo erectus* se instala en Europa
	el *Homo sapiens* empieza a evolucionar
250.000	formas arcaicas de *Homo sapiens*
	extinción del *Homo erectus*
125.000	*Homo neardenthalensis*
100.000	el *Homo sapiens* plenamente evolucionado en África y Asia
40.000	el *Homo sapiens* (hombre de Cro-Magnon) plenamente evolucionado en Europa
35.000	extinción de los Neanderthales; el *Homo sapiens* queda como la única especie humana superviviente

dio paso a especies más corpulentas. Éstas incluyeron dos especies humanas tempranas que coexistieron en África con los simios del Sur durante varios centenares de miles de años, hasta que se extinguieron.

Una diferencia importante entre los seres humanos y los demás primates es que las crías humanas precisan de mucho más tiempo para llegar a la infancia e igualmente los niños humanos tardan más en alcanzar la pubertad y la madurez, que ninguna otra especie de simios. Mientras que la progenie de otros mamíferos se desarrolla completamente en el útero materno y lo abandona ya preparado para el mundo exterior, nuestros recién nacidos están incompletamente formados y totalmente indefensos. Comparados con otros animales, las crías humanas parecen haber.nacido prematuramente.

Esta observación es la base de la hipótesis ampliamente aceptada de que el nacimiento prematuro de algunos simios podría haber tenido un papel crucial en el desencadenamiento de la evolución humana.[48] Debido a cambios genéticos en la cadencia de desarrollo, los simios prematuros podrían haber mantenido sus rasgos juveniles por más tiempo que otros. Algunas parejas de simios prematuros con estas características conocidas como *neotenia* («extensión de lo nuevo»), habrían engendrado crías aún más prematuras, que habrían mantenido por más tiempo sus rasgos juveniles, iniciándose así una tendencia evolutiva que desembocó ni una especie dotada de relativamente poco pelo, cuyos adultos se parecían en muchos aspectos a los embriones de los simios.

Según esta hipótesis, la indefensión de las crías nacidas prematuramente jugó un papel crucial en la transición de simios a humanos. Estos recién nacidos requerían la atención de sus familias, lo que podría haber originado comunidades, tribus nómadas y poblados que constituirían los cimientos de la civilización humana. Las hembras seleccionaban a machos que cuidasen de ellas mientras atendían y alimentaban a sus hijos. Más adelante, las hembras dejaron de entrar en celo en momentos determinados y siendo establemente receptivas, los machos disminuyeron su promiscuidad en favor de la atención a sus familias, cambiando los hábitos sexuales hacia nuevas estructuras sociales.

Al mismo tiempo, la libertad de las manos para fabricar herramientas, blandir armas y lanzar piedras estimuló el constante crecimiento del cerebro que caracteriza toda la evolución humana, pudiendo incluso haber contribuido al desarrollo del lenguaje. Como lo describen Margulis y Sagan:

> Al lanzar piedras y derribar o matar a pequeñas presas, los humanos primitivos fueron catapultados a un nuevo espacio evolutivo. Las habilidades para prever la trayectoria de los proyectiles, para matar a distancia, dependían del aumento del hemisferio cerebral izquierdo. Las habilidades del lenguaje (que se han asociado con el lado izquierdo del cerebro...) podrían haber acompañado fortuitamente semejante crecimiento del tamaño del cerebro.[49]

Los primeros descendientes humanos de los simios del Sur emergieron en el África oriental hace unos dos millones de años. Eran especies pequeñas y delgadas con cerebros marcadamente amplios, que les permitieron desarrollar habilidades de manufactura de herramientas muy superiores a las de cualquiera de sus antepasados simios. Esta primera especie humana recibió en consecuencia el nombre de *Homo habilis* («humano hábil»). Hace un millón seiscientos mil años, el *Homo habilis* había evolucionado hasta dar paso a una especie mayor y más robusta, cuyo cerebro también se había desarrollado. Conocido como *Homo erectus*

(«humano erguido»), esta especie perduró durante un millón de años y se volvió mucho más versátil que sus predecesores, adaptando sus tecnologías y modos de vida a un amplio espectro de condiciones medioambientales. Existen indicios de que estos humanos primitivos podrían haber conquistado el control del luego hace aproximadamente un millón cuatrocientos mil años.

El *Homo erectus* fue la primera especie en abandonar la confortable África y emigrar a Asia, Indonesia y Europa, instalándose en Asia hace un millón de años y en Europa míos cuatrocientos mil años atrás. Lejos de sus tierras africanas, los humanos primitivos debieron afrontar condiciones climáticas extremadamente duras, que tuvieron un luerte impacto en su evolución posterior. Toda la historia evolutiva de la especie humana, desde la aparición del *Homo habilis* hasta la revolución agrícola, casi dos millones de años después, coincide con las famosas Edades de Hielo.

Durante los períodos más fríos, capas de hielo cubrían gran parte de Europa y las Américas, así como pequeñas áreas de Asia. Estas glaciaciones extremas se interrumpieron en repetidas ocasiones, en las que los hielos retrocedían y dejaban espacio a climas relativamente suaves. No obstante, las inundaciones a gran escala, consecuencia de los deshielos entre los períodos de glaciación, constituían amenazas adicionales tanto para los animales como para los humanos. Muchas especies animales de origen tropical se extinguieron y fueron reemplazadas por otras más robustas y velludas -bueyes, mamuts, bisontes y otras parecidas-, capaces de hacer frente a las duras condiciones de las glaciaciones.

Los humanos primitivos cazaban estos animales con hachas y lanzas con puntas de piedra, se daban festines con su carne alrededor de las hogueras de sus cavernas y utilizaban sus pieles para protegerse del intenso frío. Al cazar juntos, compartían también el fruto de la cacería y este reparto de alimento se convirtió en otro catalizador para la civilización y la cultura humanas, dando origen en su momento a las dimensiones míticas, espirituales y artísticas de la consciencia humana.

Entre cuatrocientos y doscientos cincuenta mil años atrás, el *Horno erectus* empezó a evolucionar hasta convertirse en el *Homo sapiens* («humano sabio»), la especie a la que pertenecemos los humanos actuales. Esta evolución ocurrió gradualmente e incluyó varias especies transitorias, que se conocen como *Homo sapiens* arcaico. Hace doscientos cincuenta mil años, el *Homo erectus* ya se había extinguido; la transición a *Homo sapiens* se había completado en África y Asia unos cien mil años atrás y hace unos

treinta y Cinco mil en Europa. Desde entonces, los humanos lal y como los conocemos en la actualidad han sido la única especie humana viva.

Mientras que el *Homo erectus* evolucionaba gradualmente haría *Homo sapiens,* se ramificó en Europa una línea distinta que evolucionó en forma del clásico Hombre de Neanderthal de hace unos eiento veinticinco mil años. Denominado así por el valle de Neander en Alemania, donde fue hallado el primer espécimen, esta especie distinta perduró hasta hace unos treinta y cinco mil años. La característica complexión de los Neanderthales -robustos y corpulentos, con huesos macizos, frentes salientes e inclinadas, fuertes mandíbulas y dientes superiores salientes- se debe probablemente al hecho de que fueron los primeros humanos en pasar largos períodos en climas extremadamente fríos, habiendo aparecido al comienzo de la edad de hielo más reciente. Los Neanderthales se instalaron en el sur de Europa y en Asia, donde dejaron rastros de enterramientos rituales en cavernas decoradas con diferentes símbolos y de cultos que comprendían a los animales que cazaban. Hace unos treinta y cinco mil años desaparecieron, bien para extinguirse, bien para mezclarse con la especie en evolución de los humanos actuales.

La aventura evolutiva humana es la fase más reciente del despliegue de la vida sobre la Tierra y para nosotros ejerce por supuesto una fascinación especial. No obstante y desde la perspectiva de Gaia -el planeta vivo como un todo-, la evolución de los seres humanos constituye hasta el momento un brevísimo episodio, que podría incluso llegar a tener un abrupto final en un futuro próximo. Para demostrar cuan tarde han aparecido los humanos sobre el planeta, el medioambientalista californiano David Brower ha diseñado una ingeniosa narrativa comprimiendo la edad de la Tierra en los seis días de la historia bíblica de la creación.[50]

En el escenario de Brower, la Tierra es creada el domingo a medianoche. La vida en forma de las primeras células bacterianas aparece alrededor de la 8.00 de la mañana del martes. Durante los dos días y medio siguientes el microcosmos evoluciona, hasta estar completamente establecido el jueves a medianoche, regulando el sistema planetario por completo. El viernes sobre las 4.00 de la tarde, los microorganismos inventan la reproducción sexual y el sábado, el último día de la creación, evolucionan todas las formas visibles de vida.

Sobre la 1.30 de la madrugada del sábado se forman los primeros animales marinos y hacia las 9.30 las primeras plantas sa-

len a tierra firme, seguidas unas horas más tarde por anfibios e insectos. A las 4.50 de la tarde aparecen los grandes reptiles, que vagan durante cinco horas por exuberantes selvas tropicales y mueren luego súbitamente a las 9.45 de la noche. Mientras tanto, han llegado a la Tierra los mamíferos sobre las 5.30 de la tarde y los pájaros al atardecer, sobre las 7.15.

Poco después de las 10.00 de la noche, algunos de los mamíferos moradores de árboles en los trópicos evolucionan dando paso a los primeros primates; una hora después algunos de éstos se convierten en monos y, sobre las 11.40 de la noche, aparecen los grandes simios. Ocho minutos antes de medianoche, los primeros simios del Sur se ycrguen y andan sobre dos patas. Cinco minutos después desaparecen de nuevo. La primera especie humana, el H*omo habilis,* aparece cuatro minutos antes de medianoche, evoluciona hasta convertirse en el *Homo crecías* medio minuto después y en las formas arcaicas de *Homo sapiens* treinta segundos antes de medianoche. Los Neanderthales dominan Europa y Asia desde quince hasta cuatro segundos antes de medianoche. La moderna especie humana aparece por fin en África y Asia once segundos antes de medianoche, mientras que en Europa lo hace seis segundos más larde. La historia humana escrita empieza unos dos tercios de segundo antes de medianoche.

Hace unos treinta y cinco mil años, la moderna versión de *Homo sapiens* había reemplazado a los Neanderthales en Europa y evolucionaba hacia una subespecie conocida como Cro-Magnon -llamada así por una cueva del sur de Francia-, a la que pertenecemos todos los humanos modernos. Los Cro-Magnones eran anatómicamente idénticos a nosotros, tenían el lenguaje plenamente desarrollado y protagonizaron una verdadera explosión de innovaciones tecnológicas y actividades artísticas. Instrumentos de piedra y hueso trabajados con maestría, joyas de concha y marfil y magníficas pinturas en las paredes de cuevas húmedas e inaccesibles, son testimonios vividos de la sofisticación cultural de aquellos miembros tempranos de la raza humana.

Hasta hace poco, los arqueólogos pensaban que los Cro-Magnones habían desarrollado su arte rupestre gradualmente, empezando por dibujos más bien rústicos y elementales., para alcanzar la cima de su arte con las lamosas pinturas de Lascaux, hace unos dieciséis mil años. No obstante, el sensacional descubrimiento de la cueva de Chauvet, en diciembre de 1994, obligó a los científicos a revisar radicalmente sus opiniones. Esta gran

cueva, en la región de la Ardèche en el sur de Francia, consiste en un laberinto de cámaras subterráneas decoradas con más de trescientas pinturas altamente conseguidas. El estilo es similar al del arte de Lascaux, pero un cuidadoso examen radiocarbonológico ha demostrado que las pinturas de Chauvet tienen por lo menos treinta mil años de antigüedad.[51]

Las figuras, pintadas en ocre, sombras de carbón y hematite, son imágenes simbólicas y míticas de leones, mamuts y otros animales peligrosos, muchos de ellos corriendo o sallando a lo largo . le grandes paneles. Los especialistas en arte rupestre antiguo han quedado sorprendidos por las sofisticadas técnicas -sombreado, ángulos especiales, movimiento de las figuras, etc.- empleadas por los artistas para retratar el movimiento y la perspectiva. Además de las pinturas, la cueva de Chauvet contenía también gran cantidad de instrumentos de piedra y objetos rituales, incluso una losa en forma de altar con un cráneo de oso sobre su superficie. Quizás el hallazgo más intrigante sea un dibujo en negro de una criatura chamaníslica, medio humano, medio bisonte, situada en la parte más profunda y oscura de la cueva.

La fecha inesperadamente temprana de estas magníficas pinturas significa que el arte superior era parte integrante de la evolución de los humanos modernos desde su principio. Como señalan Margulis y Sagan:

> Semejantes pinturas señalan, por sí mismas, la presencia del *Homo sapiens* sobre la Tierra. Únicamente las personas pintan, únicamente las personas planean expediciones ceremoniales al fondo de húmedas y oscuras cavernas. Únicamente las personas entierran a sus muertos con pompa. La búsqueda del antepasado histórico es la búsqueda del narrador y del artista.[52]

Ello significa que una comprensión correcta de la evolución humana no es posible sin entender la evolución del lenguaje, el arte y la cultura. En otras palabras, debemos desplazar nuestra atención hacia la mente y la consciencia, la tercera dimensión conceptual de la visión sistémica de la vida.

Para la emergente teoría de los sistemas vivos, la mente no es una cosa sino un proceso. Es cognición, el proceso del conocimiento que se identifica con el proceso mismo de la vida. Esta es la esencia de la teoría de Santiago de la cognición, propuesta por Humberto Maturana y Francisco Varela.[1]

La identificación de mente o cognición con el proceso de \ ida es una idea radicalmente nueva en ciencia, pero es también una de las más arcaicas intuiciones de la humanidad. En tiempos pasados, la mente humana racional se veía meramente como un aspecto más del alma inmaterial o espíritu. La distinción fundamental no radicaba entre cuerpo y mente, sino entre cuerpo y alma o cuerpo y espíritu. Mientras que la diferenciación entre alma y espíritu era fluida y fluctuaba con el tiempo, ambas unificaban originalmente dos conceptos en sí mismas: el de la fuerza de la vida y el de la actividad de la consciencia.[2]

En los antiguos lenguajes de tiempos pasados, ambas ideas se expresan como el soplo de vida. Las raíces etimológicas tanto de «alma» como de «espíritu», significan en electo «soplo» en muchas lenguas antiguas. Las palabras «alma» en sánscrito *(atman),* griego *(pnenma)* y latín *(anima),* significan todas ellas «soplo». Lo mismo ocurre para «espíritu» en latín *(spiritus),* en griego *(psyche)* y hebreo *(ruah).* Todas ellas significan también «soplo».

La antigua intuición común expresada en todas estas palabras no es otra que el alma o espíritu como soplo inspirador de vida. De forma semejante, el concepto de cognición en la teoría de Santiago va mucho más allá de la mente racional, al incluir en su totalidad al proceso de la vida. Su descripción como soplo de vida constituye una acertada metáfora.

Al igual que el concepto de «proceso mental» formulado independientemente por Gregory Bateson,[3] la teoría de Santiago sobre la cognición tiene sus raíces en la cibernética. Fue desarrollada dentro del movimiento intelectual que enfoca el estudio científico de mente y conocimiento desde una perspectiva sistémica e interdisciplinaria más allá de los marcos tradicionales de la psicología y la epistemología. Este nuevo enfoque, que no ha cristalizado aún en un campo científico maduro, se conoce cada vez más como «ciencia cognitiva».[4]

La cibernética proporcionó a la ciencia cognitiva el primer modelo de cognición. Su premisa era que la inteligencia humana se parece a la «inteligencia» informática hasta tal punto que la cognición puede ser definida como el procesado de información, es decir, la manipulación de símbolos basados en un conjunto de reglas.[5] Según este modelo, el proceso de cognición comporta *representación mental.* Como un ordenador, se cree que la mente opera manipulando símbolos que representan ciertas características del mundo.[6] Este modelo informático de la actividad mental era tan persuasivo y poderoso que dominó toda la escena de la investigación en ciencia cognitiva durante más de treinta años.

Desde los años cuarenta, casi toda la neurobiología se ha visto conformada por esta idea de que el cerebro es un dispositivo para el procesado de información. Por ejemplo, cuando estudios del córtex visual demostraron que ciertas neuronas responden a ciertas características de los objetos percibidos (velocidad, color, contraste, etc.), se pensó que estas neuronas especializadas recogían información visual de la retina, para transmitirla a otras áreas del cerebro para su procesado. No obstante, posteriores estudios con animales demostraron que la asociación de neuronas con características específicas sólo es posible con animales anestesiados dentro de medios internos y externos muy controlados. Si se estudia un animal despierto, en un entorno más normal, sus respuestas neuronales se vuelven sensibles al contexto total del estímulo visual, no pudiendo ser interpretadas en términos de procesado de información paso a paso.[7]

El modelo informático de cognición fue por fin seriamente cuestionado en los años setenta con la aparición del concepto de auloorganización. La revisión de la hipótesis dominante tuvo como origen dos deficiencias de la visión inlormaticista ampliamente reconocidas. La primera es que el procesado de informa-

ción se basa en reglas secuenciales aplicadas paso a paso, una tras otra; la segunda es que dicho proceso está físicamente localizado, de modo que una lesión en cualquier parte del sistema redunda en una seria disfunción del conjunto. Ambas presunciones están en total discrepancia con la observación de la realidad biológica. Las tareas visuales más ordinarias, incluso en insectos diminutos, se efectúan mucho más rápido que cuando se simulan secuencialmente. Por otro lado, es bien conocida la resistencia del funcionamiento cerebral ante daños sufridos.

Estas observaciones inspiraron un cambio de atención de los símbolos a la conectividad, de las reglas locales a la coherencia global, del procesado de información a las propiedades emergentes de las redes neuronales. Con el desarrollo concurrente de las matemáticas no-lineales y de modelos de sistemas autoorganizadores, el mencionado cambio de atención prometía la apertura de nuevas y apasionantes vías de investigación. En efecto, a principios de los años ochenta, los modelos «conectivistas» de redes neuronales se habían vuelto muy corrientes.[8] Se trataba de modelos con elementos densamente interconectados, diseñados para realizar simultáneamente millones de operaciones capaces de generar propiedades globales interesantes o emergentes. Como explica Francisco Varela: «El cerebro es... un sistema altamente cooperativo: las densas interacciones entre sus componentes comportan que eventualmente todo lo que sucede sea una función de lo que todos los componentes están haciendo... Como resultado de ello, el sistema entero alcanza una coherencia interna en intrincados patrones, aunque no podamos explicar cómo ocurre exactamente.»''

LA TEORÍA DE SANTIAGO

La teoría de Santiago de la cognición tuvo su origen en el estudio de redes neuronales y desde su mismo principio ha estado vinculada al concepto de autopoiesis de Maturana.[10] La cognición, según Maturana, es la actividad involucrada en la autogeneración y autoperpetuación de redes autopoiésicas. En otras palabras, la cognición es el propio proceso de la vida. «Los sistemas vivos son sistemas cognitivos», escribe Maturana, «y la vida como proceso es un proceso de cognición.»" Podemos decir que, en términos de nuestros tres criterios para los sistemas vivos -estructura, patrón y proceso-, el proceso vital consiste en todas las actividades involucradas en la continua corporeización del pa-

trón (autopoiésico) de organización del sistema en una estructura (física) disipativa.

Puesto que la cognición se define tradicionalmente como el proceso del conocimiento, debemos ser capaces de describirla en términos de las interacciones de un organismo con su entorno. Esto es efectivamente lo que hace la teoría de Santiago. El fenómeno específico que subyace en el proceso de cognición, es el acoplamiento estructural. Como hemos visto, un sistema autopoiésíco sufre cambios estructurales continuos, preservando al mismo tiempo su patrón de organización en red. En otras palabras, se acopla a su entorno *eslructuralnienle* mediante interacciones recurrentes, cada una de las cuales desencadena cambios estructurales en el sistema.[12] No obstante, el sistema permanece autónomo; el medio sólo desencadena los cambios estructurales, no los especifica ni dirige.

Ahora bien, el sistema vivo no sólo especifica estos cambios estructurales, sino que especifica también *qué perturbaciones del medio los desencadenarán.* Ésta es la clave de la teoría de Santiago de la cognición. Los cambios estructurales del sistema constituyen actos de cognición. Al especificar qué perturbaciones del medio desencadenan sus cambios, el sistema «da a luz un mundo», como dicen Maturana y Varela. La cognicié>n no es pues la representación de un mundo con existencia independiente, sino más bien un constante *alumbramiento de un mundo* a través del proceso de vida. Las interacciones del sistema vivo con su entorno son interacciones cognitivas y el proceso de vida mismo es un proceso de cognición. En palabras de Maturana y Varela: «Vivir es conocer.»'[3]

Resulta obvio que tratamos aquí con una extensión radical del concepto de cognición e implícitamente del de mente. En esta nueva visión, la cognición comprende el proceso completo de vida -incluyendo la percepción, la emoción y el comportamiento-y no requiere necesariamente un cerebro y un sistema nervioso. Incluso las bacterias perciben ciertos cambios en su entorno. Notan las diferencias químicas de sus alrededores y en consecuencia nadan hacia el azúcar y se alejan del ácido; notan y evitan el calor, se alejan de la luz o se aproximan a ella e incluso algunas pueden detectar campos magnéticos.[14] Así, hasta una bacteria alumbra su propio mundo, un mundo de frío y calor, de campos magnéticos y de pendientes químicas. En todos estos procesos cognitivos, la percepciém y la acción son inseparables y, dado que los cambios estructurales y las acciones asociadas que se desencadenan en un

organismo dependen de su estructura, Francisco Varela describe la cognición como «acción corporeizada».[15]

De hecho, la cognición comprende dos clases de actividades inextricablemente vinculadas: el mantenimiento y continuación de la aulopoiesis y el alumbramiento de un mundo. Un sistema vivo es una red múltiplemente interconectada, cuyos componentes están cambiando constantemente, siendo transformados y reemplazados por otros componentes. Existe una gran flexibilidad y fluidez en semejante red, que permiten al sistema responder a las perturbaciones o «estímulos» del entorno de un modo muy especial. Ciertas perturbaciones desencadenan cambios estructurales específicos, es decir, cambios en la conectividad a través del sistema. Éste es un fenómeno distributivo; toda la red responde a una perturbación seleccionada reajustando sus patrones de conectividad.

Organismos distintos cambian de modo diferente y a lo largo del tiempo cada organismo forma su único e individual camino de cambios estructurales en el proceso de desarrollo. Puesto que estos cambios estructurales son actos de cognición, el desarrollo está siempre asociado al aprendizaje. De hecho, desarrollo y aprendizaje son dos caras de la misma moneda, ambos son expresiones del acoplamiento estructural.

No todos los actos físicos de un organismo son actos de cognición. Cuando parte de un diente de león es comida por un conejo, o cuando un animal sufre heridas en un accidente, estos cambios estructurales no están especificados y dirigidos por el organismo, no son cambios elegidos y por tanto no constituyen actos de cognición. No obstante, estos cambios físicos impuestos van acompañados de otros cambios estructurales (percepción, respuesta del sistema inmunológico, etc.) que sí son actos de cognición.

Por otro lado, no todas las perturbaciones del entorno causan cambios estructurales. Los organismos vivos responden sólo a una fracción de los estímulos que les atañen. Sabemos que podemos ver u oír fenómenos únicamente dentro de un determinado campo de frecuencias; a menudo no nos percatamos de cosas y sucesos de nuestro entorno que no nos conciernen. Sabemos también que lo que percibimos está ampliamente condicionado por nuestro marco conceptual y nuestro contexto cultural.

En otras palabras, existen muchas perturbaciones que no causan cambios estructurales en el sistema porque le son «extraños». De este modo, cada sistema construye su propio y distinto mundo, de acuerdo con su propia y distinta estructura. Como

dice Varela: «La mente y el mundo emergen juntos.»[1]" No obstante, a través del acoplamiento estructural mutuo, los sistemas vivos individuales son parte de cada uno de los mundos de los demás. Se comunican y coordinan su comportamiento.![7] Hay una ecología de mundos alumbrados por actos de cognición mutuamente coherentes.

En la teoría de Santiago, la cognición es parte integrante del modo en el que un organismo vivo interactúa con su entorno. No *reacciona* a los estímulos ambientales mediante una cadena lineal de causa y efecto, sino que *responde* con cambios estructurales en su red no lineal, organizativamente cerrada y aulopoiésica. Este tipo de respuesta capacita al sistema para proseguir con su organización autopoiésica y continuar en consecuencia viviendo en el medio. Dicho de otro modo, la interacción cognitiva del sistema con su entorno es una interacción inteligente. Desde la perspectiva de la teoría de Santiago, la inteligencia se manifiesta en la riqueza y flexibilidad del acoplamiento estructural de un sistema.

El campo de interacciones que un sistema vivo puede tener con su entorno define su «territorio cognitivo». Las emociones son parte integrante de este territorio. Por ejemplo, cuando respondemos a un insulto enfadándonos, todo el patrón de procesos psicológicos -cara roja, respiración acelerada, temblor, etc.- es parte de la cognición. De hecho, investigaciones recientes indican firmemente que hay un colorido emocional para cada acto cognitivo.[18]

A medida que aumenta el grado de complejidad de su sistema vivo, se incrementa su territorio cognitivo. El cerebro y el sistema nervioso en particular representan una expansión significativa del territorio cognitivo de un organismo, ya que incrementan mucho el campo y diferenciación de sus acoplamientos estructurales. A un cierto nivel de complejidad, un organismo vivo se acopla estructuralmente no sólo a su entorno, sino consigo mismo, alumbrando así tanto un mundo exterior como otro interior. En los seres humanos, el alumbramiento de dicho mundo interior está íntimamente vinculado con el lenguaje, el pensamiento y la consciencia.[19]

SIN REPRESENTACIÓN, NO HAY INFORMACIÓN

Formando parte de una concepción unificadora de vida, mente y consciencia, la teoría de Santiago de la cognición comporta profundas implicaciones para la biología, la psicología y la filoso-

lía, de entre las cuales su contribución a la epistemología la rama de la filosofía que estudia la naturaleza de nuestro conocimiento del mundo- constituye quizás el aspecto más polémico.

La característica particular de la epistemología implícita en la teoría de Santiago está en relación con una idea comúnmente implícita en la mayoría de epistemologías, pero raramente mencionada de forma explícita: la idea de que la cognición es una *representación* de un mundo con existencia independiente. El modelo informático de la cognición como procesamiento de ciatos era meramente una formulación específica -basada en una analogía errónea- de la idea más general de que el mundo viene dado y es independiente del observador, ocupándose la cognición de las representaciones mentales de sus características objetivas dentro del sistema cognitivo. La imagen general, según Varela, es la de un «agente cognitivo sollado en paracaídas sobre un mundo predeterminado» y extrayendo sus características esenciales a través de un proceso de representación.[20]

Según la teoría de Santiago, la cognición no es una representación de un mundo independiente y predeterminado, sino más bien el alumbramiento de un mundo. Lo que un organismo particular da a luz en el proceso de vida, no es *el* mundo sino un mundo determinado y siempre dependiente de la estructura del organismo. Puesto que los organismos individuales dentro de una misma especie tienen estructuras parecidas, alumbran mundos similares. Nosotros, los humanos, compartimos además un mundo abstracto de lenguaje y pensamiento a través del cual creamos juntos nuestro propio mundo.[21]

Maturana y Varela no nos dicen que hay un vacío ahí fuera del que creamos materia. Existe para ellos un mundo material, pero carece de características predeterminadas. Los autores de la teoría de Santiago no afirman que «nada existe», sino que «no existen cosas» independientes del proceso de cognición."'' No hay estructuras objetivamente existentes, no existe un territorio predeterminado del que podamos levantar un mapa: es el propio acto de cartografiar el mundo quien lo crea.

Sabemos por ejemplo que gatos y pájaras pueden ver los árboles, pero de modo muy distinto de como los vemos nosotros, puesto que perciben distintas franjas del espectro luminoso. Así, las formas y texturas de los «árboles» que ellos crean serán muy

* Es importante aquí destacar el juego de palabras en inglés entre *nothing exists* (nada existe) y *no things exist* (no existen cosas). *(N. del T.)*

distintas de las nuestras. Cuando vemos un árbol, no nos estamos inventando la realidad, pero el modo en que delineamos objetos e identificamos patrones de entre la multitud de estímulos sensoriales que recibimos, depende de nuestra constitución física. Como dirían Maturana y Varela, el modo en que podemos acoplarnos estructuralmente a nuestro entorno y el mundo que en consecuencia creamos dependen de nuestra propia estructura.

Junto con la idea de representaciones mentales de un mundo independiente, la teoría de Santiago rechaza también la de la información como algunas características objetivas de este mundo independiente. En palabras de Varela:

> Debemos cuestionar la ¡dea de que el mundo nos viene dado y que la cognición es representación. En ciencia cognitiva, ello significa que debemos cuestionar la idea de que la información está ahí preparada en el mundo y es extraída de éste por un sistema cognitivo.[22]

El rechazo de la representación y el de la información como elementos relevantes en el proceso del conocimiento resultan difíciles de aceptar, puesto que utilizamos ambos conceptos continuamente. Los símbolos de nuestro lenguaje, tanto hablado como escrito, son representaciones de cosas e ideas. En nuestra vida cotidiana consideramos hechos tales como la hora, la fecha, la previsión meteorológica o el teléfono de un amigo como fragmentos de información relevantes para nosotros. De hecho, nos referimos a toda nuestra era como la «de la información». Así, ¿cómo pueden Maturana y Varela afirmar que no existe información en el proceso de cognición?

Para comprender esta cuestión aparentemente incomprensible, debemos recordar que para los seres humanos la cognición incluye el lenguaje, el pensamiento abstracto y conceptos simbólicos inaccesibles a otras especies. Como veremos, la capacidad de abstracción es una característica clave de la consciencia humana, que nos permite utilizar representaciones mentales, símbolos e información. No obstante, éstas no son características generales de los procesos de cognición comunes a todos los sistemas vivos. Si bien como humanos utilizamos a menudo representaciones mentales e información, nuestro proceso cognitivo no se basa en ellas.

Para alcanzar una adecuada perspectiva sobre estas ideas, resulta muy instructiva una atenta mirada al significado de «infor-

mación». La idea convencional es que la información está de algún modo «ahí fuera», para ser recogida por el cerebro. Semejante información, no obstante, será una cantidad, un nombre, una breve frase extraída de una completa red de relaciones o contexto del que forma parte y al que otorga significado. Cuando semejante «hecho» es parte de un contexto estable con el que nos encontramos con cierta regularidad, lo extraemos de él, lo asociamos con el significado inherente a dicho contexto y lo llamamos «información». Estamos tan acostumbrados a estas abstracciones, que tendemos a creer que el significado reside en el fragmento de información más que en el contexto del que ha sido extraído.

Por ejemplo, no hay nada «informativo» en el color rojo excepto que, inmerso en una red cultural de convencionalismos y en la red tecnológica del tráfico urbano, se asocia con la obligatoriedad de detenerse en un cruce. Un semáforo en rojo muy probablemente no significaría nada especial para alguien de una cultura muy distinta a la nuestra que visitase una de nuestras ciudades. No habría en él información asociada. De forma parecida, la hora y la lecha están extraídas de un complejo contexto de conceptos e ideas, incluyendo un modelo de sistema solar, observación astronómica y convenciones culturales.

Las mismas consideraciones se aplican a la información genérica codificada en el ADN. Como explica Varela, la noción de un código genético ha sido extraída de una red metabólica subyacente en la que está embebido el significado del código:

> Durante muchos años, los biólogos han considerado las secuencias de las proteínas como instrucciones codificadas en el ADN. Resulta claro, no obstante, que los tercetos de ADN sólo son capaces de especificar correctamente un aminoácido dentro del metabolismo de la célula, es decir, de los millares de regulaciones enzimáticas de una compleja red química. Únicamente debido a estas propiedades emergentes de semejante red como un todo, podemos extraer este traslondo melabólico y considerar a los tercetos como códigos para los aminoácidos.[23]

MATURANA Y BATESON

El rechazo de Maturana a la idea de que la cognición comprende una representación mental de un mundo independiente

es la diferencia crucial entre su concepto del proceso del conocimiento y el de Gregory Bateson. Maturana y Bateson, de forma independiente y casi simultánea, llegaron a la idea revolucionaria de identificar el proceso del conocimiento con el de la vida.[24] Sus planteamientos, no obstante, fueron muy distintos: Bateson desde una profunda intuición de la naturaleza de mente y vida, aguzada por sus cuidadosas observaciones del mundo vivo; Maturana desde sus intentos de definir un patrón de organización característico de todos los sistemas vivos, basado en sus investigaciones en neurociencia.

Bateson, trabajando en solitario, fue retinando con los años sus «criterios del proceso mental», sin llegar nunca a desarrollarlos en una teoría de los sistemas vivos. Maturana, en cambio, colaboró con otros científicos para desarrollar una teoría de «la organización de lo vivo» que provee el marco teórico para la comprensión del proceso de cognición como el proceso de la vida. Como el científico social Paul Dell expresa en su extenso trabajo *Comprendiendo a Bateson y a Maturana,* Bateson se concentró exclusivamente en la epistemología (la naturaleza del conocimiento) a costa de la ontología (la naturaleza de la existencia):

> La ontología constituye la «ruta no tomada» en el pensamiento de Bateson. (...) La epistemología de Bateson carece de ontología sobre la que basarse (...). En mi opinión, el trabajo de Maturana contiene la ontología que Bateson nunca desarrolló.[25]

El examen de los criterios de Bateson para el proceso mental demuestra que cubren tanto el aspecto estructural como el del patrón de los sistemas vivos, lo que puede ser la causa de la confusión de muchos estudiantes de Bateson. Una atenta lectura de dichos criterios, revela también la creencia subyacente de que la cognición comprende representaciones mentales de las características objetivas del mundo dentro del sistema cognitivo.[26]

Bateson y Maturana crearon independientemente un concepto revolucionario de la mente que tiene sus raíces en la cibernética, una tradición a cuyo desarrollo Bateson contribuyó en los años cuarenta. Quizás debido a su íntima implicación con las ideas cibernéticas durante su génesis, Bateson nunca llegó a trascender el modelo informático de cognición. Maturana, en cambio, dejó dicho modelo atrás y desarrolló una teoría que contempla la cognición como el acto de «alumbrar un mundo» y la consciencia como íntimamente ligada al lenguaje y la abstracción.

En las páginas precedentes he enfatizado repetidamente la diferencia entre la teoría de Santiago y el modelo informático de la cognición desarrollado en cibernética. Resulta quizás útil ahora contemplar de nuevo los ordenadores a la luz de nuestra nueva comprensión de la cognición, para disipar en parte la confusión general existente sobre la «inteligencia informática».

Un ordenador procesa información, lo que significa que manipula símbolos basados en ciertas reglas. Los símbolos son elementos distintos introducidos en el ordenador desde el exterior, y durante el procesado de la información no se producen cambios en la estructura de la máquina, fijada y determinada ésta por su diseño y construcción.

El sistema nervioso de un organismo vivo funciona muy distintamente. Como hemos visto, interactúa con su entorno modulando continuamente su estructura, de modo que en lodo momento su estructura física es una rememoración de los cambios estructurales precedentes. El sistema nervioso no procesa información del mundo exterior sino que, por el contrario, *alumbra* (construye, produce) un mundo en su proceso de cognición.

La cognición humana comprende el lenguaje y el pensamiento abstracto y por tanto los símbolos y las representaciones, pero el pensamiento abstracto es tan sólo una pequeña parte de la cognición humana y generalmente no constituye la base para nuestras decisiones y acciones cotidianas. Las decisiones humanas nunca son enteramente racionales, sino que están teñidas por las emociones. El pensamiento humano se halla siempre embebido en las sensaciones y procesos corporales que forman parte de la totalidad del espectro de la cognición.

Como señalan los científicos informáticos Terry Winograd y Fernando Flores en su libro *Understanding Computers and Cognition* (Para entender los ordenadores y la cognición), el pensamiento racional filtra la mayor parte del mencionado espectro cognitivo, y al hacerlo, crea una «ceguera de abstracción». A modo de viseras, los términos que adoptamos para expresarnos limitan nuestro campo visual. En un programa informático -explican Winograd y Flores-, se formulan varios objetivos y tareas en términos de una serie limitada de objetos, propiedades y operaciones, serie que encarna la ceguera que acompaña las abstracciones implicadas en la creación del programa. No obstante:

> Hay áreas de tareas restringidas en las que esta ceguera no excluye un comportamiento que parece inteligente. Muchos juegos, por ejemplo, son susceptibles de implementar (...) técnicas [que puedenj producir un programa que venza a oponentes humanos (...). Son éstas áreas en las que la identificación de las prestaciones relevantes es directa y la naturaleza de las soluciones es clara.[27]

Gran parte de la confusión proviene del hecho de que los científicos informáticos utilizan términos como «inteligencia», «memoria» y «lenguaje» para la descripción de los ordenadores, suponiendo que dichas expresiones se refieren a los fenómenos humanos que conocemos bien por propia experiencia bajo dichos nombres. Se trata de un grave malentendido. Por ejemplo, la misma esencia de la inteligencia es actuar adecuadamente cuando un problema no está claramente definido y las soluciones no son evidentes. El comportamiento humano inteligente en tales circunstancias se basa en el sentido común acumulado a lo largo de la experiencia vivida. Los ordenadores, en cambio, no tienen acceso al sentido común debido a su ceguera de abstracción y a sus limitaciones intrínsecas de operaciones formales, siendo por tanto imposible su programación para que sean inteligentes.[28]

Desde los primeros tiempos de la inteligencia artificial, uno de los mayores desafíos ha sido la programación de un ordenador para la comprensión del lenguaje humano. Tras varias décadas de trabajo frustrante en este campo, los investigadores en inteligencia artificial han empezado a darse cuenta de la futilidad de sus esfuerzos y de que los ordenadores no pueden comprender el lenguaje humano de un modo significativo.[29] Entendemos el contexto por ser parte de nuestro sentido común, pero éste no puede ser programado en un ordenador y, por lo tanto, no puede entender nuestro lenguaje.

Este extremo puede ilustrarse con simples ejemplos como este texto utilizado por Terry Winograd: «Tommy acababa de recibir un nuevo juego de cubos. Estaba abriendo la caja cuando vio entrar a Jimmy.» Como explica Winograd, un ordenador no tendría ni idea de lo que había en la caja, pero nosotros asumimos inmediatamente que se trata del nuevo juguete de Tommy. Lo hacemos por que sabemos que los regalos suelen estar presentados en cajas y que abrir la caja es lo adecuado en este caso. Más importante aún, asumimos que las dos frases del texto están conectadas,

mientras que un ordenador no encontraría ninguna razón para relacionarla caja con el juguete. En otras palabras, nuestra interpretación de este sencillo texto se basa en varias conjeturas y expectativas de sentido común, inaccesibles al ordenador.'[0]

El hecho de que un ordenador no pueda comprender el lenguaje, no significa que no pueda ser programado para reconocer y manipular estructuras lingüísticas simples. De hecho, se ha progresado mucho en este campo en los últimos años. Los ordenadores pueden ahora reconocer unos centenares de palabras y frases y este vocabulario básico sigue en expansión. De este modo, se están utilizando cada vez más máquinas para interactuar con personas a través de las estructuras del lenguaje humano, en el desarrollo de tareas limitadas. Puedo, por ejemplo, telefonear a mi banco para solicitar información sobre mi cuenta corriente y un ordenador, activado por una serie de códigos, me informará sobre el saldo, los últimos movimientos, etc. Esta interacción, que comprende una combinación de palabras simples habladas y números tecleados, resulta muy conveniente y práctica, pero de ningún modo significa que el ordenador esté entendiendo el lenguaje humano.

Hay lamentablemente una notable diferencia entre las serias afirmaciones críticas de los investigadores en inteligencia artificia] y las proyecciones optimistas de la industria informática, fuertemente motivada por intereses comerciales. La más reciente ola de pronunciamientos entusiastas ha llegado del llamado proyecto de la quinta generación lanzado en Japón. Un análisis serio de sus grandiosos objetivos sugiere, no obstante, que éstos son tan irreales como proyecciones precedentes similares, si bien es posible que el programa produzca numerosas aplicaciones útiles.[31]

El objetivo principal del proyecto de la quinta generación y de otros proyectos de investigación análogos es el desarrollo de los llamados sistemas expertos, diseñados para superar a humanos expertos en determinadas tareas. Nos hallamos de nuevo ante un desafortunado uso de la terminología, como señalan Winograd y Flores:

> Llamar «experto» a un programa resulta tan equívoco como decir que es «inteligente» o que «comprende». El malentendido puede resultar conveniente para los que intentan conseguir fondos para la investigación o vender tales programas, pero sin duda puede conducir a expectativas inapropiadas a los posibles usuarios.[32]

A mediados de los años ochenta el filósofo Hubert Dreyfus y el científico informático Stuart Dreyfus emprendieron un minucioso estudio de la pericia humana contrastada con los sistemas informáticos expertos. Hallaron que:

> ... debemos abandonar la tradicional idea de que un principiante empieza por casos específicos y que, a medida que adquiere soltura y experiencia, abstrae e interioriza más y más reglas sofisticadas... La adquisición de pericia se mueve exactamente en la dirección opuesta: de las reglas abstractas a los casos particulares. Parece que el principiante efectúa inferencias utilizando reglas y datos al igual que un ordenador heurísticamente programado pero que, a diferencia de este, con talento y grandes dosis de experiencia propia involucrada, se transforma en un experto que sabe intuitivamente lo que hay que hacer con independencia de la aplicación de reglas.[33]

Esta observación explica por qué los sistemas expertos nunca actúan tan bien como los expertos humanos, que no lo hacen aplicando una secuencia de reglas, sino desde la base de su comprensión intuitiva de una constelación de hechos. Dreyfus y Dreyfus observaron también que en la práctica, los sistemas expertos se diseñan mediante la interrogación a expertos humanos sobre las reglas relevantes. Cuando esto ocurre, dichos expertos tienden a señalar las reglas que recuerdan de cuando eran principiantes, pero que en realidad dejaron de utilizar cuando se convirtieron en expertos. Si estas reglas se programan en un ordenador, el sistema experto resultante podrá superar a un principiante humano en el uso de aquellas regias, pero jamás podrá rivaliza]" con un verdadero experto.

INMUNOLOGÍA COGNITIVA

Algunas de las más importantes aplicaciones prácticas de la teoría de Santiago por su impacto en la neurociencia y la inmunología, serán las que probablemente aparezcan próximamente. Como ya he mencionado anteriormente, la nueva visión de la cognición clarifica enormemente el rompecabezas ancestral sobre la relación entre mente y cerebro. La mente no es una cosa sino un proceso: el proceso de cognición, que se define como el proceso de la vida. El cerebro es la estructura específica a través de la cual este proceso opera.

El cerebro no es en absoluto la única estructura involucrada en el proceso de cognición. En el organismo humano, al igual que en el de todos los vertebrados, el sistema inmunológico está siendo reconocido cada vez más como una red tan compleja e interconcctada como el sistema nervioso, puesta, como éste, al servicio de funciones de coordinación igualmente importantes. La inmunología clásica ve al sistema inmunológico como el sistema de defensas del cuerpo, dirigido hacia el exterior y descrito a menudo con términos y metáforas militares: ejércitos de glóbulos blancos, generales, soldados, etc. Los recientes descubrimientos de Francisco Varela y sus colegas en la Universidad de París comprometen seriamente estos conceptos.[54] De hecho, algunos investigadores empiezan a ver la visión clásica con sus metáforas militares como uno de los principales pilares que se han derrumbado en nuestra comprensión de las enfermedades autoinmunes como el sida.

En lugar de estar concentrado e inlerconectado a través de estructuras anatómicas como el sistema nervioso, el sistema inmunológico se halla disperso en el fluido linfático, penetrando absolutamente en todos los tejidos. Sus componentes -una clase de células llamadas linfocitos y conocidas comúnmente como glóbulos blancos- circulan con gran rapidez y enlazan químicamente unos con otros. Los linlocitos son un grupo de células muy diverso. Cada tipo se distingue por indicadores moleculares específicos llamados «anticuerpos», que sobresalen de sus superficies. El cuerpo humano contiene miles de millones de tipos distintos de glóbulos blancos, con enorme capacidad todos ellos para enlazar químicamente con cualquier perfil molecular del entorno.

Según la inmunología clásica, cuando los linlocitos identifican un agente invasor, los anticuerpos se adhieren a él neutralizándolo. Esta secuencia implica que los glóbulos blancos reconocen perfiles moleculares ajenos al organismo. Un examen más atento demuestra que también implica alguna forma de aprendizaje y memoria. En inmunología clásica, no obstante, estos términos se utilizan puramente de forma metafórica, sin dejar espacio para ningún auténtico proceso cognitivo.

La investigación reciente ha demostrado que bajo condiciones normales, los anticuerpos que circulan por el cuerpo enlazan con muchos (sino todos) tipos de células, incluyéndose a sí mismos. Todo el sistema se parece mucho más a una red, a personas hablando unas con otras, que a soldados a la caza del enemigo.

Los inmunólogos se han visto forzados a modificar gradualmente su percepción desde un *sistema* inmunológico a una *red* inmunológica.

Este cambio de percepción presenta un gran problema a la visión convencional. Si el sistema inmunológico es una red cuyos componentes enlazan unos con otros y si los anticuerpos están para eliminar aquello con lo que se enlazan, deberíamos estarnos destruyendo. Obviamente no lo estamos haciendo. El sistema inmunológico parece ser capaz de distinguí]' entre sus propias células sanguíneas y los elementos extraños, entre «sí mismo» y «no-sí mismo». Pero puesto que desde la visión clásica el reconocimiento por un anticuerpo de un agente extraño comporta su enlace químico con él y en consecuencia su neutralización, sigue siendo un misterio cómo el sistema inmunológico puede reconocer sus propias células sin neutralizarlas, es decir, destruirlas funcionalmente.

Más aún, desde el punto de vista tradicional, un sistema inmunológico se desarrollará sólo cuando existan estímulos exteriores a los que deba responder. Si no hay un ataque, no se generarán anticuerpos. Experimentos recientes han demostrado, no obstante, que incluso animales completamente aislados y protegidos de agentes patógenos desarrollan sistemas inmunológicos completos. EIlo resulta lógico desde la nueva visión, puesto que la función primordial del sistema inmunológico no es la respuesta a desafíos exteriores, sino su propia relación interna.[35]

Varela y sus colegas argumentan que el sistema inmunológico debe ser entendido como una red cognitiva autónoma, responsable de la «identidad molecular» del cuerpo. Interactuando entre sí y con las demás células del cuerpo, los linfocitos regulan constantemente el número de células y sus perfiles moleculares. Más que reaccionar meramente ante agentes externos, el sistema inmunológico desarrolla la importante función de regular el repertorio celular y molecular del organismo. Como explican Francisco Varela y el inmunólogo Antonio Coutinho: «La danza mutua entre el sistema inmunológico y el cuerpo... le permite a éste tener una identidad cambiante y plástica a través de su vida y sus múltiples encuentros.»[36]

Desde la perspectiva de la teoría de Santiago, la actividad cognitiva del sistema inmunológico resulta de su acoplamiento estructural con el entorno. Cuando entran en el cuerpo moléculas extrañas, perturban la red inmunológica desencadenando cam-

bios estructurales. La respuesta correspondiente no es la destrucción automática de las moléculas invasoras, sino la regulación de sus niveles dentro del contexto de las demás actividades reguladoras del sistema. La respuesta variará y dependerá de la totalidad del contexto de la *red.*

Cuando los inmunólogos inyectan grandes cantidades de agentes extraños en un cuerpo, como hacen en los experimentos típicos con animales, el sistema inmunología) reacciona con la respuesta defensiva masiva descrita en la teoría convencional. No obstante, como señalan Varela y Coutinho, ésta es una situación de laboratorio completamente artificial. En su entorno natural, un animal no recibe normalmente dosis masivas de substancias perjudiciales. Las pequeñas dosis que entran en su organismo son incorporadas naturalmente a las actividades reguladoras en curso en su red inmunológica.

Con esta comprensión del sistema inmunológico como una red cognitiva, autoorganizadora y autorreguladora, el rompecabezas de la distinción entre sí mismo y no-sí mismo queda fácilmente resuelto. El sistema inmunológico simplemente ni distingue ni necesita distinguir entre células del propio cuerpo y agentes extraños, puesto que ambos están sujetos a los mismos procesos reguladores. No obstante, cuando los agentes invasores son tan masivos que no pueden ser incorporados en la red de regulación, como es el caso en las infecciones, se desencadenan en el sistema inmunológico mecanismos específicos que desembocan en una respuesta defensiva.

La investigación ha demostrado que esta respuesta inmunológica bien conocida incluye mecanismos cuasiautomátieos con gran independencia de las actividades cognitivas de la red.[37] La inmunología se ha ocupado tradicionalmentc de modo casi exclusivo de esta actividad inmunológica «refleja». Esta reducción equivale a limitar el estudio del cerebro al de los reflejos. La actividad inmunológica defensiva es sin duda muy importante, pero desde la nueva perspectiva es un electo secundario de la actividad principal cognitiva del sistema inmunológico-- es otra que el mantenimiento de la identidad molecular del cuerpo.

El campo de la inmunología cognitiva se halla aún en sus inicios y las propiedades autoorganizadoras de las redes inmunológicas no están ni con mucho bien entendidas aún. No obstante, algunos de los científicos involucrados en dicho campo de investigación en crecimiento, han empezado ya a especular con apa-

sionantes aplicaciones clínicas en el tratamiento de enfermedades autoinmunes.[38] Las estrategias terapéuticas futuras podrían basarse en la comprensión de que dichas enfermedades reflejan un fallo en la operación cognitiva de la red inmunológica y podrían incorporar técnicas novedosas, diseñadas para reforzar la red estimulando su conectividad.

Estas técnicas, no obstante, requerirán una comprensión mucho más profunda de la rica dinámica de las redes inmunológicas antes de que puedan ser aplicadas con eficacia. A largo plazo, los descubrimientos en inmunología cognitiva prometen ser de tremenda importancia para todo el campo de la salud y la curación. En opinión de Varela, una visión psicosomática («mente-cuerpo») sofisticada de la salud no podrá desarrollarse hasta que comprendamos a los sistemas nervioso e inmunológico como dos sistemas cognitivos interactivos, dos «cerebros» en constante diálogo.[39]

UNA RED PSICOSOMÁTICA

Un eslabón crucial para este escenario apareció a mediados de los ochenta de la mano de la neurocientífica Candace Pert y sus colegas en el Instituto de Salud Mental de Maryland. Estos investigadores identificaron a un grupo de moléculas llamadas péptidos"" como los mensajeros moleculares que facilitan la conversación entre los sistemas nervioso e inmunológico. De hecho, Pert y sus colegas descubrieron que estos mensajeros interconectan tres sistemas distintos -el nervioso, el inmunológico y el endocrino- en una sola red.

En la visión tradicional, estos tres sistemas están separados y tienen funciones distintas. El *sistema nervioso,* consistente en el cerebro y una red de células nerviosas a través del cuerpo, es la sede de la memoria, el pensamiento y la emoción. El *sistema endocrino,* consistente en las glándulas y las hormonas, es el sistema regulador principal del cuerpo, que controla e integra varias funciones corporales. El *sistema inmunológico,* consistente en el bazo, la médula ósea, los ganglios linfáticos y las células inmunológicas que circulan por el cuerpo, es el sistema defensivo de éste,

* *Péptido:* nombre genérico de un numeroso grupo de compuestos nitrogenados formados por concatenación de dos o más aminoácidos, con enlaces caracterizados por la presencia del grupo CONH. *(N. del T.)*

responsable de la integridad y de los mecanismos de la curación de heridas y la restauración de tejidos.

De acuerdo con esta separación, los tres sistemas se estudian en tres disciplinas separadas: neurociencia, endocrinología c inmunología. No obstante, la investigación reciente sobre péptidos demuestra que estas separaciones conceptuales son meros artificios históricos que no pueden ser mantenidos por más tiempo. Según Candace Pert, los tres sistemas deben verse como partes de una misma red psicosomática.[40]

Los péptidos, una familia de 60 o 70 macromoléculas, fueron estudiados originalmente en otros contextos y recibieron diversos nombres: hormonas, neurotransmisores, endorfinas, factores del crecimiento, etc. Se necesitan muchos años para comprender que se trataba de miembros de una misma familia de mensajeros moleculares. Estos mensajeros son cortas cadenas de aminoácidos que se ligan a los receptores específicos que existen en abundancia en la superficie de todas las células del cuerpo. Al interconectar células inmunológicas, glándulas y cerebro, los péptidos forman una red psicosomática que se extiende por todo el organismo. Los péptidos son la manifestación bioquímica de las emociones, juegan un papel crucial en la coordinación de las actividades del sistema inmunológico, integrando e interconectando las actividades mentales, emocionales y biológicas.

A principios de los años ochenta, se inició un cambio de percepción espectacular con el polémico descubrimiento de que ciertas hormonas, que se suponían producidas por glándulas, son en realidad péptidos producidos y almacenados también en el cerebro. A la inversa, los científicos descubrieron que un tipo de neurotransmisores llamados endorfinas, que se suponían producidas por el cerebro, lo eran también por las células inmunológicas. A medida que se identificaban más y más receptores de péptidos, resultó que prácticamente todos los conocidos se producen en el cerebro y en otras partes del cuerpo. Esto hizo declarar a Candace Pert: «No soy ya capaz de establecer una clara distinción entre el cerebro y el resto del cuerpo.»[41]

En el sistema nervioso, los péptidos son producidos por las células nerviosas, viajando después por los axones* o neuritas (las largas ramas de dichas células) hasta almacenarse en el fon-

* *Axón:* extensión protoplasmática neuronal única que habitualmente es capaz de conducir un impulso nervioso. *(N. del T.)*

do en pequeñas esferas, donde esperan que las señales adecuadas los liberen. Estos péptidos juegan un papel vital en las comunicaciones a través del sistema nervioso. Tradicionalmente se creía que la transferencia de todos los impulsos nerviosos ocurría a través de los espacios entre células nerviosas adyacentes, denominados «sinapsis».* En realidad, este mecanismo ha resultado ser de menor importancia, quedando limitado principalmente a la contracción muscular. La mayoría de las señales procedentes del cerebro son transmitidas por péptidos emitidos por células nerviosas. Al acoplarse a receptores más allá de la célula en la que se originaron, estos péptidos actúan no sólo a través de todo el sistema nervioso, sino también en otras partes del cuerpo.

En el sistema inmunológico, los glóbulos blancos no sólo tienen receptores para todos los péptidos, sino que también los *producen.* Los péptidos controlan los patrones de migración de las células inmunológicas y todas sus funciones vitales. Este descubrimiento, al igual que los de la inmunología cognitiva, es susceptible de generar apasionantes aplicaciones terapéuticas. De hecho, Pert y su equipo han desarrollado recientemente un nuevo tratamiento para el sida, denominado Péptido T, muy prometedor.[42] Los científicos parten de la hipótesis de que el sida tiene sus raíces en una interrupción de la comunicación por péptidos. Descubrieron que el virus HI entra en las células a través de receptores péptidos específicos interfiriendo las funciones de toda la red, por lo que diseñaron un péptido protector que enlaza con dichos receptores bloqueando la acción del virus. Los péptidos se producen naturalmente en el cuerpo, pero pueden también ser diseñados y sintetizados. El péptido T imita la acción de un péptido de origen natural siendo por tanto completamente atóxico, en contraste con todas las demás medicaciones para el sida. El fármaco está siendo en la actualidad sometido a pruebas clínicas. En caso de resultar efectivo, podría tener un impacto revolucionario en el. tratamiento del sida.

Otro aspecto fascinante de la recientemente reconocida red psicosomática es el descubrimiento de que los péptidos son la manifestación bioquímica de las emociones. La mayoría de los péptidos -sino su totalidad- alteran el comportamiento y el estado de ánimo y los científicos empiezan a trabajar con la hipótesis de que cada péptido pueda evocar un determinado «tono» emo-

* *Sinopsis:* punto de contacto estrecho de dos neuronas, habitualmente entre el axón de una neurona y las dentritas o cuerpo celular de otra. *(N. del T.J*

cional. Todo el grupo de 60 o 70 péptidos podría constituir un lenguaje bioquímico universal para las emociones.

Tradicionalmente, los neurocienlíficos han asociado las emociones con áreas específicas del cerebro, principalmente con el sistema límbico. Lo cual es ciertamente correcto puesto que el sistema límbico resulta estar altamente enriquecido con péptidos. No obstante, no es la única parle del cuerpo donde se concentran receptores péplidos. Todo el intestino, por ejemplo, está cargado de ellos. Ésta es la razón por la que nos referirnos a «sentimientos viscerales». Sentimos literalmente nuestras emociones en nuestras entrañas.

Si es cierto que cada péplido mediatiza un determinado estado emocional, ello significaría que todas las percepciones sensoriales, todos los pensamientos y de hecho todas las I unciones corporales estarían teñidas por las emociones, puesto que en todas ellas intervienen los péplidos. En realidad, los científicos han descubierto que los puntos nodales del sistema nervioso central, que conectan los órganos sensoriales con el cerebro, están cargados de receptores péplidos que filtran y dan prioridad a las percepciones sensoriales. Dicho de otro modo, todas nuestras percepciones y pensamientos eslán teñidos por las emociones. Esta afirmación, por supuesto, pertenece también a la experiencia común.

El descubrimiento de esta red psicosomálica implica que, contrariamente a lo que se creía, el sistema nervioso no está estructurado jerárquicamente. Como dice Candace Pert: «Los glóbulos blancos son partes de cerebro que flotan por el cuerpo.»[43] En última instancia ello implica que la cognición es un fenómeno que se expande por el organismo, operando a través de una intrincada red química de péplidos que integra nuestras actividades mentales, emocionales y biológicas.

La identificación de la cognición con todo el proceso de la vida -incluyendo percepciones, emociones y comportamiento- y su comprensión como un proceso que no comporta transferencia de información ni representaciones mentales de un mundo externo, requieren una radical ampliación de nuestros marcos conceptuales científicos y filosóficos. Una de las razones por las que esta nueva visión de mente y cognición resulta tan difícil de aceptar, es que va en contra de nuestra intuición y experiencia cotidianas. Como humanos, utilizamos frecuentemente el concepto de información y hacemos constantemente representaciones mentales de las personas y objetos que nos rodean.

No obstante, éstas son características específicas de la cognición humana que resultan de nuestra capacidad de abstracción, aspecto fundamental de la consciencia humana. Para una completa comprensión del proceso general de cognición en los sistemas vivos es importante entender cómo la consciencia humana, con su pensamiento abstracto y sus conceptos simbólicos, emerge del proceso cognitivo común a todos los organismos vivos.

En las siguientes páginas utilizaré el término «consciencia» para describir un nivel de mente o cognición caracterizado por el conocimiento de sí mismo. El conocimiento del entorno, según la teoría de Santiago, es una propiedad común a lodos los niveles de vida.

El autoconocimiento, por lo que sabemos, se da tínicamente en los animales superiores, manifestándose en toda su plenitud en la mente humana. Como humanos, no sólo somos conscientes de nuestro entorno, sino de nosotros mismos y de nuestro mundo interior. En otras palabras, somos conscientes de que somos conscientes. No sólo sabemos, sino que sabemos que sabemos.

Es esta capacidad especial de autoconocimiento a la que me referiré con el término «consciencia».

LENGUAJE Y COMUNICACIÓN

En la teoría de Santiago, el autoconocimiento se contempla como íntimamente ligado al lenguaje y su comprensión se plantea desde un cuidadoso análisis de la comunicación. Humberto Maturana ha sido el pionero de este enfoque de la comprensión de la consciencia.'

Según Maturana, la comunicación no es transmisión de información, sino más bien una *coordinación dé comportamiento* entre organismos vivos a través del acoplamiento estructural mutuo. Esta coordinación mutua del comportamiento es la característica fundamental de la comunicación en todos los organismos vivos con o sin sistema nervioso, siendo mayores su sutileza y su exquisitez a medida que aumenta el grado de complejidad de éste.

El canto de los pájaros es una de las más bellas formas de comunicación no humana, que Maturana ilustra con el ejemplo de una determinada canción de reclamo utilizada por unos papagayos africanos. Estos pájaros viven a menudo en espesas junglas, con posibilidad prácticamente nula de establecer contacto visual. En semejante medio, se forman parejas de papagayos que coordinan su ritual de apareamiento produciendo una canción común. A un oyente casual le puede parecer que cada pájaro está cantando una melodía completa, pero una observación más atenta demuestra que dicha melodía es en realidad un dúo en el que ambos pájaros se explayan alternativamente sobre las frases melódicas del otro.

Cada pareja desarrolla su propia e irrepetible melodía, que no pasará a su descendencia. En cada generación, nuevas parejas producirán sus propias melodías características en sus rituales de apareamiento. En palabras de Maturana:

> En este caso (a diferencia de muchos otros pájaros), esta comunicación, esta coordinación conductual del canto, es netamente ontogénica (es decir, de desarrollo) (...). Lo que queremos resaltar en este ejemplo es que la melodía particular de cada pareja será única para su historia de acoplamiento.[2]

Este es un claro y bello ejemplo de la observación de Maturana de que la comunicación es esencial para la coordinación del comportamiento. En otros casos podemos sentirnos tentados a describir la comunicación en términos más semánticos, es decir, como un intercambio de información dotado de algún significado. Según Maturana, no obstante, tales descripciones semánticas no son más que proyecciones del observador humano. En realidad, la coordinación del comportamiento queda determinada no por el significado, sino por la dinámica del acoplamiento estructural.

El comportamiento animal puede ser innato («instintivo») o aprendido. Consecuentemente, podemos distinguir entre comunicación instintiva y aprendida. Maturana denomina «lingüístico» al comportamiento comunicativo aprendido. Si bien no llega a ser lenguaje, comparte con éste el rasgo característico de que la misma coordinación de comportamiento puede ser alcanzada desde distintos tipos de interacción. Al igual que distintos lenguajes en la comunicación humana, distintos tipos de acoplamiento estructural, aprendidos a lo largo de caminos de desarrollo distintos, pueden resultar en la misma coordinación de comportamiento. En realidad, desde el punto de vista de Maturana, dicho comportamiento lingüístico constituye la base para el lenguaje.

La comunicación lingüística requiere un sistema nervioso de considerable complejidad, puesto que comporta una buena dosis de aprendizaje complejo. Cuando las abejas, por ejemplo, se indican unas a otras la localización de determinadas llores bailando intrincados patrones, estas danzas están basadas en un comportamiento en parle instintivo y en parte aprendido. Los aspectos lingüísticos (o aprendidos) del baile son específicos del contexto y de la historia social de la colmena. Por decirlo de algún modo, abejas de distintas colmenas danzan en diferentes «dialectos».

Incluso formas muy sofisticadas de comunicación lingüística, como el llamado lenguaje de las abejas, no son aún lenguaje. De acuerdo con Maturana, el lenguaje emerge cuando hay *comunicación sobre la comunicación.* En otras palabras, el proceso de «lenguajco»,* como Maturana lo denomina, tiene lugar cuando existe una coordinación de las coordinaciones de comportamien-

* Ver capítulo 9. El término *languaging* devino muy popular en el curso Capra-94 del Schumaeher College y con independencia de su vertiente científica novedosa, era utilizado jocosamente entre los alumnos cada vez que alguno de los numerosos no angloparlantes presentes cometía algún desliz lingüístico. *(N. del T.)*

to. Maturana gusta de ilustrar este significado de lenguaje con una hipotética comunicación entre una gata y su amo.[3]

Supongamos que cada mañana la gata maúlla y corre hacia la nevera. La sigo, saco la botella de leche, le pongo un poco en un bol y se la toma. Esto es comunicación: una coordinación de comportamiento mediante interacciones mutuas recurrentes, o acoplamiento estructural mutuo. Supongamos ahora que una mañana no sigo a la gata porque sé que no queda leche en la nevera. Si el animal fuese capaz de comunicarme algo así como: «¡Hey!, he maullado ya tres veces, ¿dónde está mi leche?», esto sería lenguaje. La referencia a sus maullidos precedentes constituiría una comunicación sobre otra comunicación y por tanto, según la definición de Maturana, tendría la calificación de lenguaje.

Los gatos no pueden usar lenguaje en esle sentido, pero los grandes simios pueden muy bien ser capaces de ello. En una serie de experimentos bien conocidos, psicólogos americanos demostraron que los chimpancés pueden no sólo aprender muchos signos de un lenguaje, sino también combinarlos para crear nuevas expresiones.[4] Una hembra llamada Lucy inventó varias combinaciones de signos: «fruta-bebida» para melón, «comida-llorar-fuerte» para rábano y «abrir-beber-comer» para nevera.

Un día, al ver que sus «parientes» humanos se preparaban para irse, Lucy se disgustó mucho y dibujó «Lucy-llorar». Al hacer esta afirmación sobre su llanto, evidentemente comunicaba algo sobre una comunicación. «Nos parece», escribieron Maturana y Varela, «que en este punto, Lucy está "lenguajcando".»[s]

Si bien algunos primates parecen tener el potencial para comunicar en lenguaje de signos, su ámbito lingüístico es extremadamente limitado y no llega ni de lejos a la riqueza del lenguaje humano. En éste se abre un vasto espacio en el que las palabras sirven como señales para la coordinación lingüística de acciones y son también utilizadas para crear la noción de objetos. En un picnic, por ejemplo, podemos utilizar palabras como distinciones lingüísticas para coordinar nuestras acciones de poner un mantel y comida sobre el tronco de un árbol talado. Podemos además referirnos a estas distinciones lingüísticas (en otras palabras, establecer una distinción de distinciones) utilizando la palabra «mesa» y dando así a luz un objeto.

Los objetos son, según Maturana, distinciones lingüísticas de distinciones lingüísticas. Una vez que tenemos objetos, podemos crear conceptos abstractos -por ejemplo, la altura de la mesa-, estableciendo distinciones de distinciones de distinciones y así

sucesivamente. En terminología de Bateson, podríamos decir que con el lenguaje humano aparece toda una jerarquía de modelos lógicos.[6]

LENGUAJEO

Nuestras distinciones lingüísticas, además.; no están aisladas sino que existen «en la red de acoplamientos estructurales que tejemos continuamente mediante |el lenguajeo]».[7] El significado emerge como un patrón de relaciones entre estas distinciones lingüísticas, de modo que existimos en un «territorio semántico» creado por nuestro lenguajeo. Finalmente, la autoconsciencia surge cuando para describirnos a nosotros mismos utilizamos la noción de un objeto y sus conceptos abstractos asociados. De este modo el ámbito lingüístico de los seres humanos se expande hasta incluir la reflexión y la consciencia.

La unicidad del ser humano radica en su capacidad de tejer continuamente la red lingüística en la que está inmerso. Ser humano es existir en lenguaje. Mediante el lenguaje coordinamos nuestro comportamiento y juntos mediante el lenguaje damos a luz a nuestro mundo. «El mundo que todos vemos», dicen Maturana y Varela, «no es *el* mundo, sino *un* mundo, alumbrado por todos nosotros.»[8] Este mundo humano incluye en su centro nuestro mundo interior de pensamiento abstracto, conceptos, símbolos, representaciones mentales y autoconsciencia. Ser humano es estar dolado de consciencia reflexiva: «Al saber que sabemos, nos damos a luz a nosotros mismos.»[9]

En la conversación humana, nuestro mundo interior de ideas y conceptos, nuestras emociones y nuestros movimientos corporales, se entremezclan estrechamente en una compleja coreografía de coordinación de comportamiento. El análisis de filmaciones demuestra que cada conversación comprende una danza sutil y casi totalmente inconsciente, en la que la secuencia detallada de los patrones hablados está minuciosamente sincronizada no sólo con los pequeños movimientos del cuerpo del que habla, sino también con los movimientos correspondientes del que escucha. Ambos participantes se hallan unidos en esta precisa secuencia sincronizada de movimientos rítmicos y la coordinación lingüística de sus gestos mutuamente provocados, perdurará mientras prosiga su conversación.[10]

La teoría de cognición de Maturana difiere fundamentalmen-

te del resto por su énfasis en el lenguaje y la comunicación. Desde la perspectiva de la teoría de Santiago, los intentos actualmente en boga de explicar la consciencia humana en términos de efectos cuánticos en el cerebro 0 de otros procesos neurofisiológicos, están condenados al fracaso. La autoconsciencia y el despliegue de nuestro mundo interior de ¡deas y conceptos, no sólo son inaccesibles a explicaciones en términos de física o química, sino que ni siquiera pueden ser entendidos desde la biología o la psicología de un organismo aislado. Según Maturana, sólo podemos comprender la consciencia humana a través del lenguaje y de todo el contexto social en el que éste está inmerso. Como su raíz latina *(con-scire:* «saber juntos») parece indicar", la consciencia es esencialmente un fenómeno social.

Resulta también instructivo comparar la noción de dar a luz a un mundo, con el antiguo concepto indio de *maya.* El significado original de *maya* en la mitología primitiva hindú es el «poder mágico creativo» por el que el mundo es creado en la obra divina de Brahman.[11] La miríada de formas que percibimos están en su totalidad alumbradas por el divino actor y mago, *siendo karma,* que significa literalmente «acción», la fuerza dinámica de la obra.

Con el paso de los siglos, la palabra *maya* -uno de los términos más importantes de la filosofía hindú- cambió de significado. De representar el poder creativo de Brahman, pasó a significar el estado psicológico de todo aquel que se halla bajo el hechizo de la magia de la obra. Si confundimos las formas materiales de la obra con la realidad objetiva sin percibir la unidad de Brahman subyacente en todas ellas, estamos bajo el hechizo de *maya.*

El hinduismo niega la existencia de una realidad objetiva. Como en la teoría de Santiago, los objetos que percibimos son alumbrados mediante la acción. No obstante, el proceso de alumbramiento de un mundo ocurre en una escala cósmica más que en el nivel humano de cognición. Para la mitología hindú, el mundo alumbrado no es un mundo específico para una sociedad humana determinada vinculada por un lenguaje y una cultura, sino *el* mundo de la divina obra mágica que nos mantiene a todos bajo su hechizo.

ESTADOS PRIMARIOS DE CONSCIENCIA

En los últimos años, Francisco Varela ha dado otro enfoque a la consciencia, que espera que pueda añadir una dimensión adi-

clonal a la teoría de Maturana. Su hipótesis básica es que existe una forma de consciencia primaria en lodos los vertebrados superiores es que, sin llegar a ser autorreflexiva, sí incluye la experiencia de un «espacio mental unitario» o «estado mental».

Numerosos experimentos recientes con animales y seres humanos han demostrado que este espacio mental, a pesar de estar e< impuesto por múltiples dimensiones -en otras palabras, creado por diversas funciones cerebrales-, constituye una única experiencia coherente. Cuando el olor de un perfume, por ejemplo, evoca en nosotros una sensación de placer o de disgusto, experimentamos un estado mental único y coherente, compuesto de percepciones sensoriales, memorias y emociones. La experiencia no es constante, como sabemos muy bien, e incluso puede ser extremadamente corta. Los estados mentales son transitorios, aparecen y desaparecen continuamente. No obstante, no parece posible experimentarlos lucra de un determinado espacio finito de duración. Otra observación importante es que el estado experimental está siempre «corporeizado», es decir, inmerso en un determinado campo de sensación. De hecho, la mayoría de estados mentales parecen estar bajo el influjo de una sensación predominante que tiñe toda la experiencia.

Varela ha publicado recientemente un trabajo en el que adelanta su hipótesis básica y propone un mecanismo neurona] específico para la constitución de estados primarios de consciencia en todos los vertebrados superiores.[12] La idea central es que los estados experienciales transitorios están creados por un fenómeno de resonancia conocido como «bloqueo de lases», en el que distintas regiones del cerebro se encuentran interconectadas de tal modo que sus neuronas se «encienden» sincrónicamente. Mediante esta sincronización de la actividad neuronal se forman «asambleas celulares» temporales, que pueden consistir en circuitos neuronales ampliamente dispersos.

Según la hipótesis de Varela, cada experiencia cognitiva se basa en una asamblea celular específica en la que múltiples actividades neuronales -asociadas a la percepción sensorial, a las emociones, la memoria, los movimientos corporales, etc.- se unifican en un conjunto transitorio pero coherente de neuronas oscilantes. El hecho de que los circuitos neuronales tienden a oscilar rítmicamente es bien conocido por los neurocientíficos e investigaciones recientes han demostrado que estas oscilaciones no están restringidas al córtex, sino que se dan en varios niveles del sistema nervioso.

Los numerosos experimentos citados por Varela en apoyo de su hipótesis, indican que los estados cognitivos experienciales son creados por la sincronización de rápidas oscilaciones en los niveles beta y gamma, que tienden a emerger y decaer rápidamente. Cada bloqueo de lases se asocia con un tiempo característico de relajación, responsable de la duración mínima de la experiencia.

La hipótesis de Varela establece la base neurológiea para la distinción entre cognición consciente e inconsciente, que los neurocienlíficos han estado buscando desde que Sigmund Freud descubriera el inconsciente humano.[13] Según Varela, la experiencia consciente primaria común a todos los vertebrados superiores no se halla localizada en un área específica del cerebro, ni puede ser identificada en términos de estructuras neuronales específicas. La manifestación de un determinado proceso de cognición es una pasajera sincronización de diversos circuitos neuronales, que oscilan rítmicamente.

LA CONDICIÓN HUMANA

Los seres humanos evolucionaron desde los simios erguidos del Sur del género *Australopithecus* hace unos dos millones de años. La transición de simios a humanos, como hemos visto en el capítulo correspondiente, fue impulsada por dos desarrollos distintos: la indefensión de las crías prematuramente nacidas, que exigía la ayuda y colaboración de familias y comunidades, y la libertad de las manos para confeccionar y utilizar herramientas, que estimuló el crecimiento del cerebro y podría haber contribuido a la evolución del lenguaje.[14]

La teoría del lenguaje y la consciencia de Maturana nos permite interrelacionar estos dos impulsos evolutivos. Puesto que el lenguaje constituye una coordinación del comportamiento altamente sofisticada y electiva, el desarollo del lenguaje permitió a los primeros humanos incrementar grandemente sus actividades cooperativas y desarrollar familias, comunidades y tribus que les proporcionaron tremendas ventajas en la evolución. El papel crucial del lenguaje en la evolución humana no Fue la capacidad para el intercambio de ideas, sino el incremento de las posibilidades de cooperación.

A medida que aumentaban la diversidad y riqueza de nuestras relaciones humanas, nuestra humanidad -lenguaje, arte, pensamiento y cultura se desarrollaba paralelamente. Al mismo tiempo desarrollamos también la capacidad para el pensamiento abstracto, para dar a luz a un mundo interior de conceptos, objetos e imágenes de nosotros mismos. Gradualmente, a medida que este mundo interior se hacía más y más diverso y complejo, empezamos a perder el contacto con la naturaleza y a convertirnos en personalidades cada vez más fragmentadas.

Así surgió la tensión entre totalidad y fragmentación, entre cuerpo y alma, que ha sido identificada por poetas, filósofos y místicos a través de los tiempos como la esencia de la condición humana. La consciencia humana ha producido no sólo las pinturas de las cuevas de Chauvet, el Bhagavad Gita, los Conciertos de Brandenburgo y la teoría de la relatividad, sino también la esclavitud, la quema de brujas, el Holocausto y el bombardeo de Hiroshima. Entre todas las especies, somos la única que mala a sus propios miembros en nombre de la religión, la libertad de mercado, el patriotismo y otras ideas abstractas.

La filosoifía budista contiene algunas de las exposiciones más lúcidas de la condición humana y sus raíces en el lenguaje v la consciencia.[15] En la visión budista, el sufrimiento existencial humano surge cuando nos aferramos a formas fijadas y categorías creadas por la mente, en lugar de aceptar la naturaleza impermanente y transitoria de todas las cosas. El Buda enseñó que todas las formas fijadas -cosas, acontecimientos, personas o ideas- no son más que maya. Al igual que los videntes y sabios védicos utilizó este antiguo concepto hindú, pero lo bajó del lugar cósmico que ocupa en el hinduismo, para relacionarlo con el proceso de la cognición humana, dándonos así una refrescante y casi terapéutica interpretación.[I(1] Desde nuestra ignorancia *(avidya),* dividimos el mundo percibido en objetos separados que vemos como firmes y permanentes, pero que son en realidad transitorios y cambiantes. Tratando de aferramos a nuestras rígidas categorías en lugar de entender la fluidez de la vida, nos condenamos a sufrir frustración tras frustración.

La doctrina budista de la impermanencia incluye la noción de que no hay un sí mismo, de que no existe un sujeto persistente para nuestras experiencias cambiantes. Mantiene que la idea de un ser separado e individual es una ilusión, otra forma de *maya,* un concepto intelectual carente de identidad real. Aferrarse a esta idea de un sí mismo independiente, conduce al mismo dolor y sufrimiento *(duhkha)* que la adhesión a cualquier otra categoría fija de pensamiento.

La ciencia cognitiva ha llegado exactamente a la misma posición.[17] Según la teoría de Santiago, damos a luz al sí mismo al igual que damos a luz a objetos. Nuestro ser o ego carece de toda existencia independiente y no es más que el resultado de nuestro acoplamiento estructural. Un análisis detallado de la creencia en un ser fijo e independiente y su correspondiente «ansiedad cartesiana», conduce a Francisco Varela y sus colegas a la siguiente conclusión:

> Nuestro intento de atrapar un territorio interiores la esencia del ego-sí mismo y es la fuente de la continua frustración (...). Este intento de alrapar un territorio interior es en sí mismo uno más de una larga lisia de intentos que incluye nuestro aferramiento a un lerritorio exterior bajo la forma de la idea de un mundo independiente y predeterminado. En otras palabras, nuestras ansias por atrapar un territorio, tanto interior como exterior, son la causa profunda de frustración y ansiedad.[18]

Ésta es pues la cruz de la condición humana. Somos individuos autónomos, conformados por nuestro propio historial de cambios estructurales. Somos autoconscientes, sabedores de nuestra identidad individual, y aún así, cuando buscamos el ser independiente dentro de nuestro universo experiencial somos incapaces de hallar tal entidad.

El origen de nuestro dilema reside en nuestra tendencia a crear abstracciones de objetos separados, incluyendo un sí mismo independiente, para creer después que pertenecen a una realidad objetiva, dotada de existencia autárquica. Para superar esta ansiedad cartesiana, necesitamos pensar sistémicamente, desplazando nuestra atención conceptual de los objetos a las relaciones. Sólo entonces podremos comprender que identidad, individualidad y autonomía no significan separalividad e independencia. Como Lynn Margulis nos recuerda: «Independencia es un término político, no científico.»[19]

El poder del pensamiento abstracto nos ha conducido a tratar el entorno natural -la trama de la vida- como si estuviese formado por parles separadas, para ser explotadas por diferentes grupos de interés. Más aún, hemos extendido esta visión fragmentaria a nuestra sociedad humana, dividiéndola en distintas naciones, razas, religiones y grupos políticos. El convencimiento de que lodos estos fragmentos -en nosotros mismos, en nuestro entorno y en nuestra sociedad- están realmente separados, nos ha alienado de

la naturaleza v de nuestros semejantes, disminuyéndonos lamentablemente. Para recuperar nuestra plena humanidad, debemos reconquistar nuestra experiencia de conectividad con la trama entera de la vida. Esta reconexión -*religio* en latín- es la esencia misma de la base espiritual de la ecología profunda.

EPÍLOGO: ALFABETIZACIÓN ECOLÓGICA[1]

Restablecer la conexión con la trama de la vida significa reconstruir y mantener comunidades sostenibles en las que podamos satisfacer nuestras necesidades y aspiraciones sin mermar las oportunidades de generaciones venideras. Para esta tarea podemos aprender mucho de los ecosistemas, verdaderas comunidades sostenibles de plantas, animales y microorganismos. Para comprenderlos, debemos entender primero los principios básicos de la ecología; debemos, por así decir, alfabetizarnos ecológicamente.[1] Estar ecológicamente alfabetizado, ser «ecoalfabeto», significa comprender los principios de organización de las comunidades ecológicas (ecosistemas) y utilizar dichos principios para Crear comunidades humanas sostenibles. Necesitamos revitalizar nuestras comunidades -incluyendo las educativas, las de negocios y las políticas-, de modo que los principios de ecología se manifiesten en ellas como principios de educación, empresa y política.[2]

La teoría de los sistemas vivos expuesta en este libro provee de un marco conceptual para el establecimiento del vínculo entre comunidades ecológicas y humanas. Ambas son sistemas vivos que exhiben los mismos principios básicos de organización. Son redes organizativamente cerradas, pero abiertas a los flujos de energía y recursos; sus estructuras se hallan determinadas por sus historiales de cambios estructurales; son inteligentes debido a las dimensiones cognitivas inherentes en los procesos de vida.

Existen, por supuesto, múltiples diferencias entre comunidades humanas y ecosistemas. En éstos no se dan la autoconsciencia, el lenguaje, la consciencia y la cultura ni, por consiguiente, la justicia y la democracia, pero tampoco la codicia y la deshonesti-

* En el original *ecoliuteracy. (N. del T.)*

dad. Nada podemos aprender de los ecosistemas sobre estos valores y limitaciones humanos. Pero lo que sí *podernos* y debemos aprender de ellos, es cómo vivir sosteniblemente. A lo largo de más de tres mil millones de años de evolución, los ecosistemas del planeta se han organizado de formas sutiles y complejas para maximizar su sostenibilidad. Esta sabiduría de la naturaleza es la esencia de la alfabetización ecológica.

Basándonos en la comprensión de los ecosistemas como redes autopoiésicas y estructuras disipativas, podemos formular una serie de principios de organización identifícables como básicos para la ecología que nos sirvan de líneas maestras sobre las que edificar comunidades humanas sostenibles.

El primero de dichos principios es el de interdependencia. Todos los miembros de una comunidad ecológica se hallan interconectados en una vasta e intrincada red de relaciones, la trama de la vida. Sus propiedades esenciales y, de hecho, su misma existencia se derivan de estas relaciones. El comportamiento de cada miembro viviente dentro de un ecosistema depende del comportamiento de muchos otros. El éxito de toda la comunidad depende del de sus individuos, mientras que el éxito de éstos depende del de la comunidad como un todo.

Comprender la interdependencia ecológica significa comprender relaciones. Esta comprensión requiere los cambios de percepción característicos del pensamiento sistémico: de las partes al todo, de objetos a relaciones, de contenido a patrón. Una comunidad humana soslenible es consciente de las múltiples relaciones entre sus miembros. Nutrir estas relaciones equivale a nutrir la comunidad.

El hecho de que el patrón básico de la vida sea el de red significa que las relaciones entre los miembros de una comunidad ecológica son no-lineales, e incluyen múltiples bucles de retroalimentación. Las cadenas lineales de causa-efecto se dan muy raramente en los ecosistemas. De este modo, cualquier perturbación no tendrá un único efecto, sino que sus consecuencias repercutirán en patrones en constante expansión. De hecho, puede verse incluso amplificada por circuitos de retroalimentación independientes, capaces de llegar a ocultar la fuente original de la perturbación.

La naturaleza cíclica de los procesos ecológicos constituye otro importante principio de ecología. Los circuitos de retroalimentación son caminos a lo largo de los cuales los nutrientes son constantemente reciclados. Como sistemas abiertos, lodos los organismos de un ecosistema producen desechos, pero lo que es residuo para una especie constituye alimento para otra, de modo que el sistema como un todo no produce desperdicios. Comunidades enteras de organismos han evolucionado de este modo a lo largo de miles de millones de años, usando y reciclando sin cesar las mismas moléculas de minerales, agua y aire.

En este caso, la lección para las comunidades humanas resulla evidente. Uno de los principales conllictos entre economía y ecología deriva del hecho de que la naturaleza es cíclica, mientras que nuestros sistemas industriales son lineales. Nuestros negocios absorben recursos, los transforman en productos y desperdicio y venden esos productos a los consumidores, que a su vez producirán más desperdicios al usarlos. Para ser soslenibles, los patrones de producción y consumo deben ser cíclicos, a semejanza de los procesos naturales. Para alcanzar semejantes patrones cíclicos, debemos rediseñar fundamentalmente nuestros negocios y nuestra economía.[3]

Los ecosistemas difieren de los organismos individuales en que son sistemas mayoritariamente (aunque no totalmente) cerrados con respecto al flujo de materia, mientras que se muestran abiertos al flujo de energía cuya principal fuente es el Sol, cuya energía, transformada en energía química por la fotosíntesis de las plantas verdes, impulsa la mayoría de los ciclos ecológicos.

Las implicaciones para el mantenimiento de comunidades humanas sostenibles resultan de nuevo obvias. La energía solar en sus múltiples aspectos -luz solar para la producción de calor y electricidad, viento, energía hidráulica, biomasa, etc.-constituye la única clase de energía renovable, económicamente eficiente y medioambientalmente benigna. Al ignorar esta evidencia ecológica, nuestros dirigentes políticos y económicos comprometen una y otra vez el bienestar de millones de pobladores del planeta. La Guerra del Golfo en 1991, por ejemplo, que significó la muerte de cientos de miles de personas, empobreció a millones de ellas y causó desastres medioambientales sin precedentes, tuvo una de sus causas en las erróneas politicas energéticas de las administraciones Reagan y Bush.

Describir la energía solar como económicamente eficienle significa una contabilización honesta de los costes reales de la producción de energía, lo que no es el caso en la mayoría de las economías de mercado actuales. El llamado mercado libre no proporciona la adecuada información a los consumidores, ya que

capacitan a los ecosistemas para la supervivencia a las perturbaciones y para la adaptabilidad a condiciones cambiantes.

La flexibilidad de un ecosistema es una consecuencia de sus múltiples bucles de retroalimentación, que tienden a restablecer el equilibrio del sistema cada vez que se produce una desviación de la norma, debida a condiciones cambiantes del medio externo. Por ejemplo, si un verano desacostumbradamente caluroso produce un incremento en el crecimiento de las algas de un lago, mejorará el medio de los peces que se alimentan de dichas algas, con lo que tendrán mavor descendencia, que a su vez se alimentará de las algas, reduciendo su exceso. A medida que éstas disminuyen, empezará a escascar el alimento de los peces, descenderá su población y las algas podrán recuperarse. De este modo la perturbación original genera una fluctuación alrededor de un bucle de retroalimentación, que tiende a mantener el equilibrio entre peces y algas.

Perturbaciones como la descrita ocurren continuamente, puesto que las condiciones del medio cambian sin cesar y, por consiguiente, el efecto final es una constante fluctuación. Todas las variables que podemos observar en un ecosistema -densidades de población, disponibilidad de nutrientes, patrones climáticos, etc.- fluctúan sin cesar. Así es como los ecosistemas se mantienen en un estado flexible, dispuestos a adaptarse a las condiciones cambiantes. La trama de la vida es una red flexible en continua fluctuación. Cuantas más variables se mantengan fluctuando, más dinámico será el sistema y mayor su capacidad para adaptarse a los cambios.

Toda fluctuación ecológica se desarrolla dentro de unos límites de tolerancia. Existe siempre el peligro de que todo el sistema se colapse cuando una fluctuación transgrede dichos límites y el sistema no es ya capaz de compensarla. Lo mismo se puede aplicar a las comunidades humanas. La falta de flexibilidad se manifiesta en forma de estrés. El estrés se da cuando una o más variables del sistema se llevan a sus valores exiremos, lo que induce una creciente rigidez a través del mismo. El estrés temporal es un aspecto esencial de la vida, pero el estrés prolongado resulta perjudicial y destructivo. Estas consideraciones conducen a la importante conclusión de que la buena gestión de un sistema social -una compañía, una ciudad, un sistema económico- significa el descubrimiento de los valores *óptimos* de sus variables. El tratar de maximizar alguna de dichas variables en lugar de optimizarla, Conducirá irremediablemente a la destrucción del sistema como un todo.

El principio de flexibilidad sugiere también una correspon diente estrategia de resolución de conflictos. En toda comunidad aparecen inevitablemente discrepancias y conflictos que no pueden ser resueltos en favor de una u otra parte. Por ejemplo, la comunidad necesitará estabilidad y cambio, orden y libertad, tradición *e* innovación. Estos conflictos se resuelven mucho mejor desde el establecimiento de un equilibrio dinámico que desde las decisiones rígidas. La alfabetización ecológica incluye la comprensión de que ambas partes de un conflicto pueden ser importantes en función del contexto y de que las contradicciones en el seno de una comunidad son signos de su diversidad y vitalidad, que contribuyen por tanto a la viabilidad del sistema.

El papel de la diversidad en los ecosistemas está íntimamente vinculado a su estructura en red. Un ecosistema diverso será también resistente, puesto que contendrá en su seno multiplicidad de especies con funciones ecológicas superpuestas, que pueden reemplazarse parcialmente. Cuando una especie determinada es destruida por una severa perturbación!, de modo que se rompe un vínculo de la red, un ecosistema diverso será capaz de reorganizarse y sobrevivir gracias a que otros vínculos de la red podrán, al menos parcialmente, realizar la función de la especie desaparecida. Dicho de otro modo, cuanto más compleja sea la red, más grande será la complejidad de su patrón de interconexiones y en consecuencia mayor será su resistencia.

En los ecosistemas, la complejidad de su red es consecuencia de su biodiversidad; por tanto, una comunidad ecológica diversa es una comunidad resistente. En las comunidades humanas, la diversidad étnica y cultural puede representar el mismo papel. En este caso, diversidad significa distintos tipos de relaciones, distintos modos de enfrentarse al mismo problema. Una comunidad humana diversa es pues una comunidad resistente, capaz de adaptarse a situaciones cambiantes.

No obstante, la diversidad es sólo una ventaja estratégica si se trata de una comunidad verdaderamente vibrante, sostenida por una red de relaciones. Si la comunidad se halla fragmentada en grupos e individuos aislados, la diversidad puede fácilmente convertirse en una fuente de prejuicios y fricciones. Pero si la comunidad es consciente de la interdependencia de todos sus miembros, la diversidad enriquecerá todas las relaciones y en consecuencia a la comunidad entera, así como a cada uno de sus individuos. En una comunidad así, la información y las ideas fluyen libremente por toda la red y la diversidad de interpretaciones

y de estilos de aprendizaje -incluso de errores- enriquece a toda la comunidad.

Éstos son pues algunos de los principios básicos de la ecología: interdependencia, reciclaje, asociación, flexibilidad, diversidad y, como consecuencia de todos ellos, sostenibilidad. A medida que nuestro siglo se acerca a su fin y nos aproximamos al principio de un nuevo milenio, la supervivencia de la humanidad dependerá de nuestra alfabetización ecológica, de nuestra capacidad de comprender estos principios de ecología y vivir en consecuencia.

APÉNDICE: BATESON DE NUEVO

En este apéndice examinaré los seis criterios fundamentales de Bateson para el proceso mental y los compararé con la teoría de Santiago de la cognición.[1]

1. *Una menté es un agregado de. parles o componentes interactuanles.*

Este criterio se halla implícito en el concepto de *red* autopoiésica, que es una red de componentes interactuantes.

2. La interacción entre las partes de la mente es desencadenada por la diferencia.

Según la teoría de Santiago, un organismo vivo alumbra un mundo mediante el establecimiento de distinciones. La cognición resulta de un patrón de distinciones y éstas son percepciones de diferencias. Una bacteria, por ejemplo, como menciono en la página 277, percibe diferencias de concentración química y temperatura.

Así, tanto Maturana como Bateson enfatizan la diferencia, pero mientras que para Maturana las características particulares de una diferencia son parte del mundo alumbrado en el proceso de cognición, Bateson -como señala Dell- trata las diferencias como características objetivas del mundo. Ello resulta manifiesto en el modo en que Bateson introduce su concepto de diferencia en *Mina, and Nature:*

> Toda recepción de información es necesariamente una recepción de noticias de *diferencia*, y toda percepción de diferencia queda limitada por un umbral. Las diferencias presentadas de modo demasiado ligero o lento no son perceptibles.[2]

Así pues, en opinión de Bateson pues, las diferencias son características objetivas del mundo, pero no todas resultan perceptibles. Denomina «diferencias potenciales» a las no percibidas y «diferencias efectivas» a las que lo son. Las diferencias efectivas se convierten en fragmentos de información, explica Bateson, ofreciendo la siguiente definición: «La información consiste en diferencias que marcan la diferencia.»[3]

Con su definición de información como diferencias efectivas, Bateson se aproxima mucho al concepto de Maturana de que las perturbaciones del medio desencadenan cambios estructurales en los organismos vivos. Bateson enfatiza también que distintos organismos perciben distintas clases de diferencias y que por tanto no existen información ni conocimiento objetivos. Sin embargo, mantiene la noción de que la objetividad existe «ahí fuera», en el mundo físico, aunque no podamos conocerla. La idea de las diferencias como características objetivas del mundo es aún más explícita en los dos últimos criterios de Bateson para el proceso mental.

3. *El proceso mental requiere energía colateral.*

Con este criterio, Bateson resalla la distinción entre las formas en que los sistemas vivos y los no vivos interactúan con sus entornos. Como Maturana, distingue claramente entre la reacción de un objeto material y la respuesta de un organismo vivo. Pero mientras que Maturana describe la autonomía de la respuesta del organismo en términos de acoplamiento estructural y patrones no-lineales de organización, Bateson lo hace en términos de energía. «Cuando doy un puntapié a una piedra», argumenta, «doy energía a la piedra y se mueve con esta energía... Si le pego una patada a un perro, responderá con energía [recibida] de [su] metabolismo.»[4]

No obstante, Bateson era bien consciente de que los patrones no-lineales de organización constituyen una característica fundamental de los sistemas vivos, como demuestra su próximo criterio.

4. *El proceso mental requiere cadenas circulares (o más complejas) de determinación.*

La caracterización de los sistemas vivos en términos de patrones no-lineales de causalidad fue la clave que condujo a Maturana al concepto de autopoiesis, mientras que la causalidad nolineal es también un ingrediente básico en la teoría de estructuras disipativas de Ilya Prigogine.

Los primeros cuatro criterios de Bateson para el proceso mental se hallan pues implícitos en la teoría de Santiago de la cognición. Es en sus dos últimos criterios, donde se pone de manifiesto la diferencia crucial entre los puntos de vista de Bateson y Maturana sobre la cognición.

5. *En el proceso mental, los efectos de la diferencia deben ser vistos como transformaciones (es decir, versiones codificadas) de sucesos que los han precedido.*

Aquí Bateson asume explícitamente la existencia de un mundo independiente, que consta de rasgos objetivos tales como objetos, acontecimientos y diferencias. Esta realidad externa independiente es luego «transformada» o «codificada» en una realidad interior. En otras palabras, Bateson acepta la idea de que la cognición comporta representaciones mentales de un mundo objetivo.

El último criterio de Bateson desarrolla aún más su posición «representacionista».

6. *La descripción* y *clasificación de estos procesos de transformación revelan una jerarquía de prototipos lógicos inmanentes en los fenómenos.*

Para ilustrar este criterio, Bateson utiliza el ejemplo de dos organismos comunicándose entre sí. Siguiendo el modelo informático de cognición, describe la comunicación en términos de mensajes -es decir, señales físicas objetivas tales como sonidos-, que son enviados de un organismo a otro y luego codificados, es decir, transformados en representaciones mentales.

En semejantes comunicaciones -argumenta Bateson-, el intercambio de información consistirá no sólo en mensajes, sino también en mensajes sobre la codificación, que constituyen una clase distinta de información. Se trata de mensajes sobre los mensajes o «metamensajes», que Bateson caracteriza como de un «prototipo lógico» distinto, tomando este término prestado de los filósofos Bertrand Russell y Alfred North Whitehead. Esta propuesta le conduce naturalmente a postular «mensajes sobre los metamensajes» y así sucesivamente, o dicho en otras palabras, una «jerarquía de prototipos lógicos». La existencia de dicha jerarquía de prototipos lógicos constituye el último criterio de Bateson para el proceso mental.

La teoría de Santiago proporciona también una descripción de la comunicación entre organismos vivos. En opinión de Matu-

rana, ésta no comprende ningún intercambio de mensajes o de información, pero sí que incluye «comunicación sobre la comunicación», y por tanto, lo que Bateson denomina una jerarquía de prototipos lógicos. Sin embargo, según Maturana, dicha jerarquía emerge con el lenguaje y la autoconscicncia humanos y no es una característica común a todos los fenómenos de cognición.[5] Con el lenguaje humano surgen el pensamiento abstracto, los conceptos, los símbolos, las representaciones mentales, la autoconsciencia y las restantes cualidades de la consciencia. En opinión de Maturana, los códigos de Bateson, sus «transformaciones» y sus prototipos lógicos -sus dos últimos criterios-, son características, no de la cognición en general, sino de la consciencia humana en particular.

En los últimos años de su vida, Bateson se debatió para hallar criterios adicionales que pudiera aplicar a la consciencia. Si bien sospechaba que «el lenómeno está de algún modo relacionado al asunto de los prototipos lógicos»,'[1] no consiguió reconocer sus dos últimos criterios como criterios relacionados con la consciencia, más que con el proceso mental. Personalmente creo que este error impidió a Bateson profundizar en la naturaleza de la mente humana.

NOTAS

PREFACIO

I. Citado en Judson (1979), pp. 209, 220.

CAPÍTULO 1

1. Una de las mejores fuentes es *State afilie World,* una serie de informes anuales publicados por el Worldwatch Institute de Washington, D.C. Otros excelentes informes se pueden hallar en Havvken (1993) y Core (1992).
2. Brown(198l).
3. Ver Capra (1975).
4. Kuhn(1962).
5. Ver Capra(l982).
6. Capra (1986)
7. Ver Devall y Sessions (1985).
8. Ver Capra y Steindl-Rast (1991).
9. Ame Naess, citado en Devall y Sessions (1985), p. 74.
10. Ver Merchant (1994), Fox (1989).
II. Ver Bookchin (1981).
12. Eisler(1987).
13. Ver Merchant (1980).
14. Ver Spretnak(1978, 1993).
15. Ver Capra(1982), p.43.*.
16. Ver p. 55.
17. Arne Naess, citado en Fox (1990), p. 217.
18. Ver Fox (1990), pp. 246-47.
19. Macy(199t).
20. Fox (1990).
21. Roszak(1992).
22. Citado en Capra (1982), p. 55.

CAPÍTULO 2

1. Verpp. 148-50.
2. Bateson (1972), p. 449.
3. Ver Windelband (1901), p. 139 y ss.
4. Ver Capra (1982), p. 53 y ss.
5. R. D. Laing citado en Capra (1988), p. 133.
6. Ver Capra (1982), pp. 107-108.
7. Blake(1802).
8. Ver Capra (1983), p. 6.
9. Ver Haraway (1976), pp. 40-42.
10. Ver Windelband (1901), p. 565.
11. Ver Webster y Goodwin (1982).
12. Kant (1790, edición 1987), p. 253.
13. Verp. 101.
14. Ver Spretnak (1981), p. 30 y ss.
15. Ver Gimbutas (1982).
16. Verp. 102 y ss.
17. Ver Sachs (1995).
18. Ver Webster y Goodwin (1982).
19. Ver Capra (1982), p. 108 y ss.
20. Ver Haraway (1976), pp. 22 y ss.
21. Koestler(1967).
22. Ver Driesch(1908), p. 76 y ss.
23. Sheldrake(1981).
24. Ver Haraway (1976), p. 33 y ss.
25. Ver Lilienfeíd (1978), p. 14.
26. Mi agradecimiento a Heinz von Foerster por esta observación.
27. Ver Haraway (1976), pp. 131, 194.
28. Citado ibíd., p. 139.
29. Ver Chekland (1981), p. 78.
30. Ver Haraway (1976), p. 147 y ss.
31. Citado en Capra (1975), p. 264.
32. Citado ibíd., p. 139.
33. Desafortunadamente, los editores británicos y americanos de Heisenberg no se percataron del significado de este título y retitularon el libro como *Physics and Beyond* (Más allá de la física); ver Heisenberg (1971).
34. Ver Lilienfeíd (1978), p. 227 y ss.
35. Christian von Ehrenfelds, «Über "Gestaltqualitäten"», (1890); reeditado en Weinhandl (1960).
36. Ver Capra (1982), p. 427.
37. Ver Heims (1991), p. 209.
38. Ernst Haeckel, citado en Maren-Grisebach (1982), p. 30.
39. Uexküll(1909).
40. Ver Ricklefs (1990), p. 174 y ss.
41. Ver Lincoln y otros (1982).
42. Vernadsky (1926); ver también Marhulis & Sagan (1995), p. 44 y ss.
43. Verp. 117 y ss.
44. Ver Thomas (1975), pp. 26 y ss., 102 y ss.
45. Citado ibíd.
46. Ver Burns y otros (1991).
47. Patten (1991).

CAPÍTULO 3

1. Debo esta visión a mi hermano, Bernt Capra, formado como arquitecto.
2. Citado en Capra (1988), p. 66.
3. Citado ibíd.
4. Citado ibíd.
5. Ver ibid., p. 50 y ss.
6. Citado en Capra (1975), p. 126.
7. Citado en Capra (1982), p. 101.
8. Odum(1953).
9. Whitehead(1929).
10. Cannon(1932).
11. Mi gratitud a Vladímir Maikov y sus colegas en la Academia Rusa de Ciencias por permitirme conocer el trabajo de Bogdanov.
12. Citado en Gorelik (1975).
13. Para un resumen detallado sobre tektología, ver Gorelik (1975).
14. Verp. 64 y ss.
15. Verpp. 171-72.
16. Verp. 103 y ss.
17. Verp. 151.
18. Verp. 74 y ss.
19. Verp. 129 y ss.
20. Ver Mattessich (1983-1984).
21. Citado en Gorelik (1975).
22. Ver Bertalanffy (1940) para su primera discusión sobre sistemas abiertos publicada en alemán y Bertalanffy (1950) para su pri-

mer ensayo sobre sistemas abiertos publicado en inglés, reeditado en Emery (1969).

23. Ver p. 93 y ss.

24. Ver Davidson (1983); ver también Lilienfeld (1978), pp. 16-26 para un breve resumen del trabajo de Bertalanffy.

25. Bertalanffy (1968), p. 37.

26. Ver Capra (1982), p. 72 y ss.

27. La «primera ley de termodinámica» es la ley de la conservación de la energía.

28. El término es una combinación de «energía» con *tropos*, palabra griega que significa «transformación» o «evolución».

29. Bertalanffy (1968), p.121.

30. Ver p. 197 y ss.

31. Ver p. 103 y ss.

32. Bertalanffy (1968), p. 84.

33. Ibíd., pp. 80-81.

CAPÍTULO 4

1. Wiener (1948). La frase aparece en el subtítulo del libro.
2. Wiener (1950), p. 96.
3. Ver Heims (1991).
4. Ver Varela y otros (1991), p. 38.
5. Ver Heims (1991).
6. Ver Heims (1980).
7. Citado ibíd., p 208.
8. Ver Capra (1988), p. 73 y ss.
9. Ver p. 185 y ss.
10. Ver Heims (1991), p. 19 y ss.
11. Wiener (1950), p. 24.
12. Ver Richardson (1991), p. 17 y ss.
13. Citado ibíd., p. 94.
14. Cannon (1932).
15. Ver Richardson (1991), pp. 5-7.
16. En lenguaje ligeramente más técnico, las etiquetas «+» y «-» se llaman «polaridades» y la regla dice que la polaridad de un bucle de retroalimentación es el producto de las polaridades de sus vínculos causales.
17. Wiener (1948), p. 24.
18. Ver Richardson (1991), p. 59 y ss.
19. Ver ibíd., p. 79 y ss.
20. Maruyama (1963).
21. Ver Richardson (1991), p. 204.
22. Ver p. 172.
23. Heinz von Foerster, comunicación privada, enero de 1994.
24. Ashby (1952), p. 9.
25. Wiener (1950), p. 32.
26. Ashby (1952), p. 4.
27. Ver Varela y otros (1992), p. 39 y ss.
28. Citado en Weizenbaum (1976), p. 138.
29. Ver ibíd., p. 23 y ss.
30. Citado en Capra (1982), p. 47.
31. Ver p. 284.
32. Ver p. 294.
33. Weizenbaum (1976), pp. 8, 226.
34. Wiener (1948), p. 38.
35. Wiener (1950), p. 162.
36. Postman (1992), Mander (1991).
37. Postman (1992), p. 19.
38. Ver Sloan (1985), Kane (1993), Bowers (1993), Roszak (1994).
39. Roszak (1994), p. 87 y ss.
40. Bowers (1993), p. 17 y ss.
41. Ver Douglas D. Noble, «El régimen de la tecnología en la educación», en Kane (1993).
42. Ver Varela y otros (1992), p. 85 y ss.

CAPÍTULO 5

1. Ver Checkland (1981), p. 123 y ss.
2. Ver ibíd., p. 129.
3. Ver Dickson (1971).
4. Citado en Checkland (1981), p. 137.
5. Ver ibíd.
6. Ver Richardson (1992), p. 149 y ss. y 170 y ss.
7. Ulrich (1984).
8. Ver Königswieser y Lutz (1992).
9. Ver Capra (1982), p. 116 y ss.
10. Lilienfeld (1978), pp. 191-192.
11. Ver pp. 138-40.
12. Ver pp. 38-39.
13. Ver p. 56.
14. Ver p. 175 y ss.
15. Ver Varela y otros (1992), p. 94.

16. Ver p. 79 y ss.
17. McCulloch y Pitts (1943).
18. Ver p. ej. Ashby (1947).
19. Ver Yovits y Cameron (1959), Foerster y Zopf (1962) y Yovits, Jacobi y Goldstein (1962).
20. La definición matemática de redundancia es R = 1 – H/Hmax, donde H es la entropía del sistema en un momento dado y Hmax es la máxima entropía posible de dicho sistema.
21. Para una relación detallada de la historia de estos proyectos de investigación, ver Paslack (1991).
22. Citado ibíd., p. 97n.
23. Ver Prigogine y Stengers (1984), p. 142.
24. Ver Laszlo (1987), p. 29.
25. Ver Prigogine y Stengers (1984), p. 146 y ss.
26. Ibíd., p. 143.
27. Prigogine (1967).
28. Prigogine y Glansdorff (1971).
29. Citado en Paslack (1991), p. 105.
30. Ver Graham (1987).
31. Ver Paslack (1991), pp. 106-107.
32. Citado ibíd., p. 108; ver también Haken (1987).
33. Reimpreso en Haken (1983).
34. Graham (1987).
35. Citado en Paslack (1991), p. 111.
36. Eigen (1971).
37. Ver Prigogine y Stengers (1984), p. 133 y ss.; ver también Laszlo (1987), p. 31 y ss.
38. Ver Laszlo (1987), pp. 34-35.
39. Citado en Paslack (1991), p. 112.
40. Humberto Maturana en Maturana y Varela (1980), p. xii.
41. Maturana (1970).
42. Citado en Paslack (1991), p. 156.
43. Maturana (1970).
44. Citado en Paslack (1991), p. 155.
45. Maturana (1970); ver p. 162 y ss. para más detalles y ejemplos.
46. Ver p. 274 y ss.
47. Humberto Maturana en Maturana y Varela (1980), p. xvii.
48. Maturana y Varela (1972).
49. Varela, Maturana y Uribe (1974).
50. Maturana y Varela (1980), p. 75.
51. Ver pp. 38 y 83.
52. Maturana y Varela (1980), p. 82.

53. Ver Capra (1985).
54. Geoffrey Chew, citado en Capra (1975), p. 296.
55. Ver p. 171 y ss.
56. Ver pp. 42-43 y 52.
57. Ver Kelley (1988).
58. Ver Lovelock (1979), p. 1 y ss.
59. Lovelock (1991), pp. 21-22
60. Ibíd., p. 12.
61. Ver Lovelock (1979), p. 11.
62. Lovelock (1972).
63. Margulis (1989).
64. Ver Lovelock (1991), pp. 108-11; ver también Harding (1994).
65. Margulis (1989).
66. Ver Lovelock y Margulis (1974).
67. Lovelock (1991), p. 11.
68. Ver p. 43 y ss.
69. Ver pp. 231 y 243.
70. Ver Lovelock (1991), p. 62.
71. Ver ibíd., p. 62 y ss.; ver también Harding (1994).
72. Harding (1994).
73. Ver Lovelock (1991), pp. 70-72.
74. Ver Schneider y Boston (1991).
75. Jantsch (1980).

CAPÍTULO 6

1. Citado en Capra (1982), p. 55.
2. Citado en Capra (1982), p. 63.
3. Stewart (1989), p. 38.
4. Citado ibíd., p. 51.
5. Para ser precisos, la presión es la fuerza dividida por el área sobre la que el gas está ejerciendo presión.
6. Quizás se deba aclarar aquí un aspecto técnico. Los matemáticos distinguen entre variables dependientes e independientes. En la función y = f(x), *y* es la variable dependiente y *x* la independiente. Las ecuaciones diferenciales se denominan «lineales» cuando todas las variables *dependientes* aparecen elevadas a la primera potencia, mientras que las variables independientes pueden aparecer elevadas a potencias superiores. Por el contrario, se denominan «no-lineales» cuando las variables *dependientes* aparecen elevadas a potencias superiores. Ver también p. 131.
7. Ver Stewart (1989), p. 83.

8. Ver Briggs y Peat (1989), p. 52 y ss.
9. Ver Stewart (1989), p. 155 y ss.
10. Ver Stewart (1989), pp. 95-96.
11. Ver p. 137.
12. Citado en Stuart (1989), p. 71.
13. Ibíd., p. 72. Ver p. 145 y ss. para un detallado estudio sobre atractores extraños.
14. Ver Capra (1982), p. 75 y ss.
15. Ver Prigogine y Stengers (1984), p. 247.
16. Ver Mosekilde y otros (1988).
17. Ver Gleick (1987), p. 11 y ss.
18. Citado en Gleick (1987), p. 18.
19. Ver Stewart (1989), p. 106 y ss.
20. Ver p. 103 y ss.
21. Ver Briggs y Peat (1989), p. 84 y ss.
22. Abraham y Shaw (1982-1988).
23. Mandelbrot (1983).
24. Ver Peitgen y otros (1990). Esta cinta de vídeo, que contiene una asombrosa animación por ordenador e interesantes entrevistas con Benoît Mandelbrot y Edward Lorenz, es una de las mejores introducciones a la geometría fractal.
25. Ver ibíd.
26. Ibíd.
27. Ver Mandelbrot (1983), p. 34 y ss.
28. Ver Dantzig (1954), p 181 y ss.
29. Citado en Dantzig (1954), p. 204.
30. Citado en ibíd., p. 189.
31. Citado en ibíd., p. 190.
32. Ver Gleick (1987), p. 221 y ss.
33. Para números reales, resulta fácil entender que cualquier número mayor que 1 continuará creciendo al ser repetidamente elevado al cuadrado, mientras que cualquier número menor que 1 sometido a la misma operación continuará decreciendo. Añadir una constante en cualquier paso de la iteración antes de elevar al cuadrado, añade aún mayor variedad, y para números complejos, toda la situación se complica todavía más.
34. Citado en Gleick (1987), pp. 221-22.
35. Ver Peitgen y otros (1990).
36. Ver Peitgen y otros (1990).
37. Ver Peitgen y Richter (1986).
38. Ver Grof (1976).
39. Citado en Peitgen y otros (1990).

40. Citado en Gleick (1987), p. 52.

CAPÍTULO 7

1. Maturana y Varela (1987), p. 47. En lugar de «patrón de organización», los autores utilizan simplemente el término «organización».
2. Ver p. 38-39.
3. Ver p. 112 y ss.
4. Ver p. 103 y ss.
5. Ver pp. 103-06.
6. Ver pp. 99-101.
7. Maturana y Varela (1980), p. 49.
8. Ver Capra (1982), p. 119.
9. Ver p. 254.
10. Para hacerlo, las enzimas utilizan la otra hebra complementaria del ADN como plantilla para la sección a reemplazar. La duplicidad de hebras del ADN es pues esencial para estos procesos de reparación.
11. Mi agradecimiento a William Holloway por su ayuda en la investigación sobre los fenómenos en forma de vórtice.
12. Técnicamente, este efecto es consecuencia del mantenimiento de la inercia angular.
13. Ver pp. 153.
14. Ver pp. 202-04.
15. Ver p. 73.
16. Las primeras discusiones de Bateson publicadas sobre estos criterios, llamados inicialmente «características mentales», pueden encontrarse en dos ensayos: «La cibernética del "ser": una teoría del alcoholismo» («The Cybernetics of "Self": A Theory of Alcoholism») y «Patologías de la epistemología» («Pathologies of Epistemology»), ambos reimpresos en Bateson (1972). Para una discusión más extensa, ver Bateson (1979), p. 89 y ss. Ver apéndice, p. 315 y ss. para una detallada discusión de los criterios de Bateson para los procesos mentales.
17. Ver Bateson (1972), p. 478.
18. Ver p. 113.
19. Bateson (1979), p. 8.
20. Citado en Capra (1988), p. 88.
21. Ver p. 113.
22. Ver p. 274 y ss.
23. Revonsuo y Kamppinen (1994), p. 5.
24. Ver p. 291 y ss.

CAPÍTULO 8

1. Ver p. 67.
2. Odum (1953).
3. Prigogine y Stengers (1984), p. 156.
4. Ver p. 103 y ss.
5. Prigogine y Stengers (1984), pp. 22-23.
6. Ibíd., pp. 143-144.
7. Ver pp. 129 y ss.
8. Prigogine y Stengers (1984), p. 140.
9. Ver p. 142.
10. Prigogine (1989).
11. Citado en Capra (1975), p. 45.
12. He utilizado el término general «bucles catalíticos» para referirme a muchas relaciones complejas no-lineales entre catalizadores, incluyendo la autocatálisis, la catálisis cruzada y la autoinhibición. Para más detalles, ver Prigogine y Stengers (1984), p. 153.
13. Prigogine y Stengers (1984), p. 292.
14. Ver p. 34.
15. Ver p. 67.
16. Prigogine y Stengers (1984), p. 129.
17. Ver pp. 137-38.
18. Ver Prigogine y Stengers (1984), pp. 123-124.
19. Si N es el número total de partículas y N_1 partículas están en un lado y N_2 en el otro, el número de diferentes posibilidades viene dado por $P = N! / N_1!\, N_2!$, donde $N!$ es una abreviatura de 1x2x3 . . . xN.
20. Prigogine (1989).
21. Ver Briggs y Peat (1989), p. 45 y ss.
22. Ver Prigogine y Stengers (1984), p. 144 y ss.
23. Ver Prigogine (1980), p. 104 y ss.
24. Goodwin (1994), p. 89 y ss.
25. Ver p. 231.
26. Prigogine y Stengers (1984), p. 176.
27. Prigogine (1989).

CAPÍTULO 9

1. Ver p. 105.
2. Ver p. 114.
3. Ver p. 124 y ss.
4. Ver p. 101.
5. Von Neumann (1966).
6. Ver Gardner (1971).
7. En cada área de tres por tres hay una célula central rodeada por ocho vecinas. Si las células vecinas son negras, la central se vuelve negra al siguiente paso («nacimiento»); si dos vecinas son negras, la central no cambia («supervivencia»); en todos los casos restantes la célula central se vuelve blanca («muerte»).
8. Ver Gardner (1970).
9. Para un excelente resumen de la historia y aplicaciones del autómata celular, ver Farmer, Toffoli y Wolfram (1984), especialmente el prefacio de Stephen Wolfram. Para una colección de publicaciones más técnica y reciente, ver Gutowitz (1991).
10. Varela, Maturana y Uribe (1974).
11. Estos movimientos e interacciones pueden expresarse formalmente como reglas matemáticas de transición de aplicación simultánea a todas las células.
12. Algunas de las probabilidades matemáticas correspondientes sirven como parámetros variables del modelo.
13. La probabilidad de desintegración debe ser inferior a 0,01 por cada paso de tiempo para alcanzar cualquier estructura viable y el perímetro debe contener al menos diez vínculos; ver Varela, Maturana y Uribe (1974) para más detalles.
14. Ver Kauffman (1993), p. 182 y ss.; ver también Kauffman (1991), para un breve resumen.
15. Ver p. 143 y ss. Hay que tener en cuenta, no obstante, que dado que los valores de las variables binarias cambian discontinuamente, su espacio fase es asimismo discontinuo.
16. Ver Kauffman (1993), p. 183.
17. Ver ibíd., p. 191.
18. Ibíd., p. 441 y ss.
19. Ver p. 84 y ss.
20. Varela y otros (1992), p.188.
21. Kauffman (1991).
22. Ver Kauffman (1993), p. 479.
23. Kauffman (1991).
24. Ver Luisi y Varela (1989), Bachmann y otros (1990), Walde y otros (1994).
25. Ver Fleischaker (1990).
26. Ver Fleischaker (1992) para un debate reciente sobre muchos de los temas comentados en las páginas siguientes; ver también Mingers (1995).
27. Maturana y Varela (1987), p. 89.
28. Ver p. 295 y ss.

29. Maturana y Varela (1987), p. 199.
30. Ver Fleischaker (1992); Mingers (1995), p. 119 y ss.
31. Mingers (1995), p. 127.
32. Ver Fleischaker (1992), pp. 131-141; Mingers (1995), pp. 125-126.
33. Maturana (1988); ver también pp. 299-300.
34. Varela (1981).
35. Luhmann (1990).
36. Ver p. 121.
37. Ver p. 117 y ss.
38. Lovelock (1991), p. 31 y ss.
39. Ver p. 219.
40. Ver p. 110.
41. Ver Lovelock (1991), pp. 135-136.
42. Harding (1994).
43. Ver Margulis y Sagan (1986), p. 66.
44. Margulis (1993); Margulis y Sagan (1986).
45. Ver p. 247 y ss.
46. Margulis y Sagan (1986), pp. 14, 21.
47. Ibíd., p. 271.
48. Citado en Capra (1975), p. 183.
49. Ver p. 244 y ss.
50. Ver Lovelock (1991), p. 127.
51. Ver Maturana y Varela (1987), p. 75 y ss.
52. Ibíd., p. 95.

CAPÍTULO 10

1. Ver Capra (1982), p. 116 y ss.
2. Citado ibíd., p. 114.
3. Margulis (1995).
4. Ver p. 238 y ss.
5. Ver pp. 215-216.
6. Ver Gould (1994).
7. Kauffman (1993), pp. 173, 408, 644.
8. Ver Jantsch (1980) y Laszlo (1987) para los primeros intentos de síntesis de algunos de estos elementos.
9. Lovelock (1991), p. 99.
10. Ver Margulis y Sagan (1986), p. 15 y ss.
11. Ver Capra (1982), pp. 118-119.
12. Ver Margulis y Sagan (1986), p. 75.
13. Ibíd., p. 16.

14. Ibíd., p. 89.
15. Ver ibíd.
16. Ver ibíd.
17. Margulis (1995).
18. Ver p. 178.
19. Ver Margulis y Sagan (1986), p. 17.
20. Ibíd., p. 15.
21. Margulis y Sagan (1986); ver también Margulis y Sagan (1995) y Calder (1983).
22. Margulis y Sagan (1986), p. 51.
23. Ver pp. 110-11; ver también Kauffman (1993), p. 287 y ss.
24. Ver p. 219.
25. Margulis y Sagan (1986), p. 64.
26. Ver p. 178.
27. Margulis y Sagan (1986), p. 78.
28. Ver Lovelock (1991), p. 80 y ss.
29. Ver Margulis (1993), p. 160 y ss.
30. Ver pp. 178-79.
31. Margulis y Sagan (1986), p. 93.
32. Ibíd., p. 191.
33. Ibíd., p. 103.
34. Ibíd., p. 109.
35. Ver Lovelock (1991), p. 113 y ss.
36. Ver p. 175 y ss.
37. Ver p. 241 y ss.
38. Margulis y Sagan (1986), p. 119.
39. Ver p. 178.
40. Ver Margulis y Sagan (1986), p. 133.
41. Ver Thomas (1975), p. 141 y ss.
42. Margulis y Sagan (1986), p. 155 y ss.
43. Ver Margulis, Schwartz y Dolan (1994).
44. Margulis y Sagan (1986), p. 174.
45. Ibíd., p. 73.
46. Ver Margulis y Sagan (1995), p. 140 y ss.
47. Margulis y Sagan (1986), p. 214.
48. Ver ibíd., p. 208 y ss.
49. Ibíd., p. 210.
50. Brower (1995), p.18.
51. Ver *New York Times*, 8 de junio de 1995; Chauvet y otros (1995).
52. Margulis y Sagan (1986), pp. 223-224.

CAPÍTULO 11

1. Ver pp. 187-88.
2. Ver Windelband (1901), pp. 232-233.
3. Ver p. 186 y ss.
4. Ver Varela y otros (1991), p. 4 y ss.
5. Ver p. 84 y ss.
6. Ver Varela y otros (1991), pp. 8, 41.
7. Ibíd., pp. 93-94.
8. Ver Gluck y Rumelhart (1990).
9. Varela y otros (1991), p. 94.
10. Ver pp. 114-15.
11. Ver ibíd.
12. Ver pp. 229-31.
13. Maturana y Varela (1987), p. 174.
14. Ver Margulis y Sagan (1995), p. 179.
15. Varela y otros (1991), p. 200.
16. Ibíd., p. 177.
17. Ver p. 295 y ss.
18. Ver p. 293.
19. Ver p. 299.
20. Varela y otros (1991), p. 135.
21. Ver p. 299.
22. Varela y otros (1991), p. 140.
23. Ibíd., p. 101.
24. Ver p. 186.
25. Dell (1985).
26. Ver apéndice, p. 315 y ss.
27. Winograd y Flores (1991), p. 97.
28. Ver ibíd., p. 93 y ss.
29. Ibíd., p. 107 y ss.
30. Ibíd., p. 113.
31. Ibíd., p. 133 y ss.
32. Ibíd., p. 132.
33. Dreyfus y Dreyfus (1986), p. 108.
34. Ver Varela y Coutinho (1991a).
35. Ver Varela y Coutinho (1991b).
36. Varela y Coutinho (1991a).
37. Ibíd.
38. Ver Varela y Coutinho (1991b).
39. Francisco Varela, comunicación privada, abril de 1991.
40. Pert y otros (1985); Pert (1993).

41. Pert (1989).
42. Ver Pert (1992); Pert (1995).
43. Pert (1989).

CAPÍTULO 12

1. Maturana (1970), Maturana y Varela (1987), Maturana (1988).
2. Maturana y Varela (1987), pp. 193-194.
3. *Humberto Maturana, comunicación privada, 1985.*
4. Ver Maturana y Varela (1987), p. 212 y ss.
5. Ibíd., p. 215.
6. Ver apéndice, pp. 317-18.
7. Maturana y Varela (1987), p. 234.
8. Ibíd., p. 245.
9. Ibíd., p. 244.
10. Ver Capra (1982), p. 302.
11. Ver Capra (1975), p. 88.
12. Varela (1995).
13. Ver Capra (1982), p. 178.
14. Ver p. 269.
15. Ver Varela y otros (1991), p. 217 y ss.
16. Ver Capra (1975), p. 93 y ss.
17. Ver Varela y otros (1991), p. 59 y ss.
18. Ibíd., p. 143.
19. Margulis y Sagan (1995), p. 26.

EPÍLOGO

1. Ver Orr (1992).
2. Para aplicaciones de los principios de ecología a la educación, ver Capra (1993); para aplicaciones al mundo de los negocios, ver Callenbach y otros. (1993), Capra y Pauli (1995).
3. Ver Hawken (1993).
4. Ver ibíd., p. 75 y ss.
5. Ver Hawken (1993), p. 177 y ss.; Daly (1995).
6. Ver Callenbach y otros (1993).

APÉNDICE

1. Bateson (1979), p. 89 y ss. Ver p. 186 y ss. y p. 283 y ss. para los contextos históricos y filosóficos del concepto de Bateson de proceso mental.
2. Bateson (1979), p. 29.

3. **Ibíd.**, p. 99.
4. **Ibíd.**, p. 101.
5. **Ver** p. 299.
6. **Bateson** (1979), p. 128.

BIBLIOGRAFIA

ABRAHAM, RALPH H. y CHRISTOPHER D. SHAW, *Dynamics: The Geometry of Behavior*, vols. 1-4, Aerial Press, Santa Cruz, California, 1982-1988.

ASHBY, ROSS, «Principles of the Self-Organizing System», *Journal of General Psychology*, vol. 37, 1947, p. 125.

—, *Design for a Brain*, John Wiley, Nueva York, 1952.

—, *Introduction to Cybernetics*, John Wiley, Nueva York, 1956.

BACHMANN, PASCALE ANGELICA, PETER WALDE, PIER LUIGI LUISI y JACQUES LANG, «Self-Replicating Reverse Micelles and Chemical Autopoiesis», *Journal of the American Chemical Society*, 112, 1990, 8200-8201.

BATESON, GREGORY, *Steps to an Ecology of Mind*, Ballantine, Nueva York, 1972.

—, *Mind and Nature: A Necessary Unity*, Dutton, Nueva York, 1979.

BERGÉ, P., «Raleigh-Bénard Convection in High Prandtl Number Fluid», en H. Haken, *Chaos and Order in Nature*, Springer, Nueva York, 1981, pp. 14-24.

BERTALANFFY, LUDWIG VON, «Der Organismus als physikalisches System betrachtet», *Die Naturwissenschaften*, vol. 28, 1940, pp. 521-531.

—, «The Theory of Open Systems in Physics and Biology», *Science*, vol. 111, 1950, pp. 23-29.

—, *General System Theory*, Brazilier, Nueva York, 1968.

BLAKE, WILLIAM, carta a Thomas Butts, 22 de noviembre de 1802; en Alicia Ostriker (ed.), *William Blake: Poesía Completa*, Ed. 29, 1995; 1.ª ed.: Penguin, Nueva York, 1977.

BOOKCHIN, MURRAY, *The Ecology of Freedom*, Cheshire Books, Palo Alto, California, 1981. (Edición en Castellano: *Ecología libertaria*, Nossa y Jara, 1990.)

BOWERS, C. A., *Critical Essays on Education, Modernity, and the Reco-*

very of the Ecological Imperative, Teachers College Press, Nueva York, 1993.

BRIGGS, JOHN y F. DAVID PEAT, *Turbulent Mirror*, Harper & Row, Nueva York, 1989.

BROWER, DAVID, *Let the Mountains Talk, Let the Rivers Run*, HarperCollins, Nueva York, 1995.

BROWN, LESTER R., *Building a Sustainable Society*, Norton, Nueva York, 1981.

—, *State of the World*, Norton, Nueva York, 1984-1994. (Edición en castellano: *La situación en el mundo*, Apóstrofe, 1992-1993; EMECÉ, 1995.)

BURNS, T. P., B. C. PATTEN y H. HIGASHI, «Hierarchical Evolution in Ecological Networks», en Higashi, M., y T. P. Burns, *Theoretical Studies of Ecosystems: The Network Perspective*, Cambridge University Press, Nueva York, 1991.

BUTTS, ROBERT y JAMES BROWN (eds.), *Constructivism and Science*, Kluwer, Dordrecht, Holanda, 1989.

CALDER, NIGEL, *Timescale*, Viking, Nueva York, 1983.

CALLENBACH, ERNEST, FRITJOF CAPRA, LENORE GOLDMAN, SANDRA MARBURG y RÜDIGER LUTZ, *EcoManagement*, Berrett-Koehler, San Francisco, 1993.

CANNON, WALTER B., *The Wisdom of the Body*, Norton, Nueva York, 1932; ed. rev., 1939.

CAPRA, FRITJOF, *The Tao of Physics*, Shambhala, Boston, 1975; 3.ª ed. actualizada, 1991. (Edición en castellano: *El Tao de la Física*, Luis Cárcamo, 1984-1992.)

—, *The Turning Point*, Simon & Schuster, Nueva York, 1982. (Edición en castellano: *El punto crucial*, Integral, 1985.)

—, *Wendezeit* (versión alemana de *El punto crucial*), Scherz, 1983.

—, «Bootstrap Physics: A Conversation with Geoffrey Chew», en Carleton deTar, Jerry Finkelstein y Chung-I Tang (eds.), *A Passion for Physics*, World Scientific, Singapore, 1985, pp. 247-286.

—, «The Concept of Paradigm and Paradigm Shift», *Re-Vision*, vol. 9, n.º 1, 1986, p. 3.

—, *Uncommon Wisdom*, Simon & Schuster, Nueva York, 1988. (Edición en castellano: *Sabiduría insólita*, Kairós, 1990.)

CAPRA, FRITJOF, y DAVID STEINDL-RAST, con THOMAS MATUS, *Belonging to the Universe*, Harper & Row, San Francisco, 1991. (Edición en castellano: *Pertenecer al universo*, EDAF, 1994.)

CAPRA, FRITJOF (ed.), *Guide to Ecoliteracy*, 1993; disponible a través del Center for Ecoliteracy (Centro de Alfabetización Ecológica), 2522 San Pablo Avda., Berkeley, California 94702, EE.UU.

CAPRA, FRITJOF, y GUNTER PAULI (eds.), *Steering Business toward Sustainability*, United Nations University Press, Tokio, 1995.

CHAUVET, JEAN-MARIE, ÉLIETTE BRUNEL DESCHAMPS y CHRISTIAN HILLAIRE, *La Grotte Chauvet à Vallon-Pont-d'Arc*, Seuil, París, 1995.

CHECKLAND, PETER, *Systems Thinking, Systems Practice*, John Wiley, Nueva York, 1981.

DANTZIG, TOBIAS, *Number: The Language of Science*, 4.ª ed., Macmillan, NuevaYork, 1954.

DALY, HERMAN, «Ecological Tax Reform», en Capra y Pauli (1995), pp. 108-124.

DAVIDSON, MARK, *Uncommon Sense: The Life and Thought of Ludwig von Bertalanffy*, Tarcher, Los Ángeles, 1983.

DELL, PAUL, «Understanding Maturana and Bateson», *Journal of Marital and Family Therapy*, vol. 11, n.º 1, pp. 1-20, 1985.

DEVALL, BILL, y GEORGE SESSIONS, *Deep Ecology*, Peregrine Smith, Salt Lake City, Utah, 1985.

DICKSON, PAUL, *Think Tanks*, Atheneum, Nueva York, 1971.

DREYFUS, HUBERT, y STUART DREYFUS, *Mind over Machine*, Free Press, Nueva York, 1986.

DRIESCH, HANS, *The Science and Philosophy of the Organism*, Aberdeen University Press, Aberdeen, 1908.

EIGEN, MANFRED, «Molecular Self-Organization and the Early Stages of Evolution», *Quarterly Reviews of Biophysics*, 4, 2&3, 149, 1971.

EISLER, RIANE, *The Chalice and the Blade*, Harper & Row, San Francisco, 1987.

EMERY, F. E. (ed.), *Systems Thinking: Selected Readings*, Penguin, Nueva York, 1969.

FARMER, DOYNE, TOMASO TOFFOLI y STEPHEN WOLFRAM (eds.), *Cellular Automata*, North-Holland, 1984.

FLEISCHAKER, GAIL RANEY, «Origins of Life: An Operational Definition», *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* 20, pp. 127-137, 1990.

— (ed.), «Autopoiesis in Systems Analysis: A Debate», *International Journal of General Systems*, vol. 21, n.º 2, 1992.

FOERSTER, HEINZ VON, y GEORGE W. ZOFF (eds.), *Principles of Self-Organization*, Pergamon, Nueva York, 1962.

FOX, WARWICK, «The Deep Ecology-Ecofeminism Debate and its Paralels», *Environmental Ethics* 11, 5-25, 1989.

—, *Toward a Transpersonal Ecology*, Shambhala, Boston, 1990.

GARCÍA, LINDA, *The Fractal Explorer*, Dynamic Press, Santa Cruz, California, 1991.

GARDNER, MARTIN, «The Fantastic Combinations of John Conway's

New Solitaire Game "Life"», *Scientific American*, 223, 4, 1970, pp. 120-123.
—, «On Cellular Automata, Self-Reproduction, the Garden of Eden, and the Game "Life"», *Scientific American*, 224, 2, 1971, pp. 112-117.
GIMBUTAS, MARIJA, «Women and Culture in Goddess-Oriented Old Europe», en Charlene Spretnak (ed.), *The Politics of Women's Spirituality*, Anchor, Nueva York, 1982.
GLEICK, JAMES, *Chaos*, Penguin, Nueva York, 1987. (Edición en castellano: *Caos, la creación de una ciencia*, Seix-Barral, 1988-1994.
GLUCK, MARK y DAVID RUMELHART, *Neuroscience and Connectionist Theory*, Lawrence Erlbaum, Hillsdale, Nueva Jersey, 1990.
GOODWIN, BRIAN, *How the Leopard Changed Its Spots*, Scribner, Nueva York, 1994.
GORE, AL, *Earth in the Balance*, Houghton Mifflin, Nueva York, 1992. (Edición en castellano: *La tierra en juego*, EMECÉ, 1993.)
GORELIK, GEORGE, «Principal Ideas of Bogdanov's "Tektology": The Universal Science of Organization», *General Systems*, vol. XX, 1975, pp. 3-13.
GOULD, STEPHEN JAY, «Lucy on the Earth in Stasis», *Natural History*, n.º 9, 1994.
GRAHAM, ROBERT, «Contributions of Hermann Haken to Our Understanding of Coherence and Selforganization in Nature», en R. Graham y A. Wunderlin (eds.), *Lasers and Synergetics*, Springer, Berlín, 1987.
GROF, STANISLAV, *Realms of the Human Unconscious*, Dutton, Nueva York, 1976.
GUTOWITZ, HOWARD (ed.), *Cellular Automata: Theory and Experiment*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1991.
HAKEN HERMANN, *Laser Theory*, Springer, Berlín, 1983.
—, «Synergetics: An Approach to Self-Organization», en F. Eugene Yates (ed.), *Self-Organizing Systems*, Plenum, Nueva York, 1987.
HARAWAY, DONNA JEANNE, *Crystals, Fabrics and Fields: Metaphors of Organicism in Twentieth-Century Developmental Biology*, Yale University Press, New Haven, 1976.
HARDING, STEPHAN, «Gaia Theory», notas para conferencias, sin publicar, Schumacher College, Dartington, Devon, Inglaterra, 1994.
HAWKEN, PAUL, *The Ecology of Commerce*, HarperCollins, Nueva York, 1993.
HEIMS, STEVE J., *John von Neumann and Norbert Wiener*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1980.

—, *The Cybernetics Group*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1991.
HEISENBERG, WERNER, *Physics and Beyond*, Harper & Row, Nueva York, 1971.
JANTSCH, ERICH, *The Self-Organizing Universe*, Pergamon, Nueva York, 1980.
JUDSON, HORACE FREELAND, *The Eighth Day of Creation*, Simon & Schuster, Nueva York, 1979.
KANE, JEFFREY (ed.), *Holistic Education Review*, Número especial: Technology and Childhood, verano de 1993.
KANT, EMMANUEL, *Critique of Judgment* (1790), Hackett, Indianápolis, 1987. (6.ª ed. en castellano, *Crítica del juicio*, Espasa Calpe, 1995.)
KAUFFMAN, STUART, «Antichaos and Adaptation», *Scientific American*, agosto de 1991.
—, *The Origins of Order*, Oxford University Press, Nueva York, 1993.
KELLEY, KEVIN (ed.), *The Home Planet*, Addison-Wesley, Nueva York, 1988.
KOESTLER, ARTHUR, *The Ghost in the Machine*, Hutchinson, Londres, 1967.
KÖNIGSWIESER, ROSWITA y CHRISTIAN LUTZ (eds.), *Das Systemisch Evolutionäre Management*, Orac, Viena, 1992.
KUHN, THOMAS S., *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, Chicago, 1962. (Edición en castellano: *Qué son las revoluciones científicas y otros ensayos*, Paidós Ibérica, 1989.)
LASZLO, ERWIN, *Evolution*, Shambhala, Boston, 1987. (Edición en castellano: *Evolución: la gran síntesis*, Espasa Calpe, 1988.)
LILIENFELD, ROBERT, *The Rise of Systems Theory*, John Wiley, Nueva York, 1978.
LINCOLN, R. J. y otros, *A Dictionary of Ecology*, Cambridge University Press, Nueva York, 1982.
LORENZ, EDWARD N., «Deterministic Nonperiodic Flow», *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 20, 1963, pp. 130-141.
LOVELOCK, JAMES, «Gaia As Seen through the Atmosphere», *Atmospheric Environment*, vol. 6, 1972, p. 579.
—, *Gaia*, Oxford University Press, Nueva York, 1979.
—, *Healing Gaia*, Harmony Books, Nueva York, 1991. (Edición en castellano: *Gaia: una ciencia para curar el planeta*, Integral, 1992.)
LOVELOCK, JAMES y LYNN MARGULIS, «Biological Modulation of the Earth's Atmosphere», *Icarus*, vol. 21, 1974.
LUHMANN, NIKLAS, «The Autopoiesis of Social Systems», en Niklas Luhmann, *Essays on Self-Reference*, Columbia University Press, Nueva York, 1990.

Luisi, Pier Luigi y Francisco J. Varela, «Self-Replicating Micelles. A Chemical Version of a Minimal Autopoietic System», *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 19, pp. 633-643, 1989.

Macy, Joanna, *World As Lover, World As Self*, Parallax Press, Berkeley, California, 1991.

Mandelbrot, Benoit, *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman, Nueva York, 1983. (1.ª edición en francés, 1975; 2.ª ed. en castellano: *Los objetos fractales*, Tusquets, 1988.)

Mander, Jerry, *In the Absence of the Sacred*, Sierra Club Books, San Francisco, 1991.

Maren-Grisebach, Manon, *Philosophie der Grünen*, Olzog, Munich, 1982.

Margulis, Lynn, «Gaia: The Living Earth», diálogo con Fritjof Capra, *The Elmwood Newsletter*, Berkeley, California, vol. 5, n.° 2, 1989.

—, *Symbiosis in Cell Evolution*, 2.ª ed., Freeman, San Francisco, 1993.

—, «Gaia Is a Tough Bitch», en John Brockman, *The Third Culture*, Simon & Schuster, Nueva York, 1995.

Margulis, Lynn y Dorion Sagan, *Microcosmos*, Tusquets, 1995; 1ª ed. Summit, Nueva York, 1986.

—, *What Is Life?*, Simon & Schuster, Nueva York, 1995.

Margulis, Lynn, Karlene Schwartz y Michael Dolan, *The Illustrated Five Kingdoms*, HarperCollins, Nueva York, 1994.

Maruyama, Magoroh, «The Second Cybernetics», *American Scientist*, vol. 51, 1963, pp. 164-179.

Mattessich, Richard, «The Systems Approach: Its Variety of Aspects», *General Systems*, vol. 28, 1983-1984, pp. 29-40.

Maturana, Humberto, «Biology of Cognition», publicado originalmente en 1970; reimpreso en Maturana y Varela (1980).

—, «Reality: The Search for Objectivity or the Quest for a Compelling Argument», *Irish Journal of Psychology*, vol. 9, n.° 1, 1988, pp. 25-82.

Maturana, Humberto, y Francisco Varela, «Autopoiesis: The Organization of the Living», publicado originalmente bajo el título *De máquinas y seres vivos*, Editorial Universitaria, Santiago de Chile, 1972; reimpreso en Maturana y Varela (1980).

—, *Autopoiesis and Cognition*, D. Reidel, Dordrecht, Holanda, 1980.

—, *The Tree of Knowledge*, Shambhala, Boston, 1987. (Edición en castellano: *El Árbol del Conocimiento*, Editorial Debate, 1990.)

McCulloch, Warren S. y Walter H. Pitts, «A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity», *Bulletin of Mathematics Biophysics*, vol. 5, 1943, p. 115.

Merchant, Carolyn, *The Death of Nature*, Harper & Row, Nueva York, 1980.

Merchant, Carolyn,(ed.), *Ecology*, Humanities Press, Atlantic Highlands, Nueva Jersey, 1994.

Mingers, John, *Self-Producing Systems*, Plenum, Nueva York, 1995.

Mosekilde, Erik, Javier Aracil y Peter M. Allen, «Instabilities and Chaos in Nonlinear Dynamic Systems», *System Dynamics Review*, vol. 4, 1988, pp. 14-55.

Mosekilde, Erik y Rasmus Feldberg, *Nonlinear Dynamics and Chaos* (en danés), Polyteknisk Forlag, Lyngby, 1994.

Neumann, John von, *Theory of Self-Reproducing Automata*, editado y completado por Arthur W. Burks, University of Illinois Press, Champaign, Illinois, 1966.

Odum, Eugene, *Fundamentals of Ecology*, Saunders, Filadelfia, 1953. (Edición en castellano: *Ecología: bases científicas para un nuevo paradigma*, Vedra, 1993.)

Orr, David W., *Ecological Literacy*, State University of New York Press, Albany, Nueva York, 1992.

Paslack, Rainer, *Urgeschichte der Selbstorganisation*, Vieweg, Braunschweig, Alemania, 1991.

Patten, B. C., «Network Ecology», en Higashi, M., y T. P. Burns, *Theoretical Studies of Ecosystems: The Network Perspective*, Cambridge University Press, Nueva York, 1991.

Peitgen, Heinz-Otto y Peter Richter, *The Beauty of Fractals*, Springer, Nueva York, 1986.

Peitgen, Heinz-Otto, Hartmut Jürgens, Dietmar Saupe y C. Zahlten, «Fractals: An Animated Discussion», VHS/color/63 minutos, Freeman, Nueva York, 1990.

Pert, Candace, Michael Ruff, Richard Weber y Miles Herkenham, «Neuropeptides and Their Receptors: A Psychosomatic Network», *The Journal of Immunology*, vol. 135, n.° 2, 1985, pp. 820-826.

Pert, Candace, Presentation at Elmwood Symposium, «Healing Ourselves and Our Society», Boston, 9 de diciembre de 1989 (sin publicar).

—, «Peptide T: A New Therapy for AIDS», Elmwood Symposium with Candace Pert, San Francisco, 5 de noviembre de 1992 (sin publicar); grabaciones disponibles a través de Advanced Peptides Inc., 25 East Loop Road, Stony Brook, Nueva York, 11790.

—, «The Chemical Communicators», entrevista con Bill Moyers, *Healing and the Mind*, Doubleday, Nueva York, 1993.

—, «Neuropeptides, AIDS, and the Science of Mind-Body Healing», entrevista en *Alternative Therapies*, vol. 1, n.° 3, 1995.

POSTMAN, NEIL, *Technopoly*, Knopf, Nueva York, 1992. (Edición en castellano: *Tecnópolis: la rendición de la cultura a la tecnología*, Galaxia Gutenberg, 1994.)

PRIGOGINE, ILYA, «Dissipative Structures in Chemical Systems», en Stig Claesson (ed.), *Fast Reactions and Primary Processes in Chemical Kinetics*, Interscience, Nueva York, 1967.

—, *From Being to Becoming*, Freeman, San Francisco, 1980.

—, «The Philosophy of Instability», *Futures*, 21, 4, 1989, pp. 396-400.

PRIGOGINE, ILYA, y PAUL GLANSDORFF, *Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuation*, Wiley, Nueva York, 1971.

PRIGOGINE, ILYA e ISABELLE STENGERS, *Order out of Chaos*, Bantam, Nueva York, 1984.

REVONSUO, ANTTI y MATTI KAMPPINEN (eds.), *Consciousness in Philosophy and Cognitive Neuroscience*, Lawrence Erlbaum, Hillsdale, Nueva Jersey, 1994.

RICHARDSON, GEORGE P., *Feedback Thought in Social Science and Systems Theory*, University of Pennsylvania Press, Filadelfia, 1992.

RICKLEFS, ROBERT E., *Ecology*, 3.ª ed. Freeman, Nueva York, 1990.

ROZSAK, THEODORE, *The Voice of the Earth*, Simon & Schuster, Nueva York, 1992.

—, *The Cult of Information*, U.C. Press, Berkeley, California, 1994.

SACHS, AARON, «Humbolt's Legacy and the Restoration of Science», *World Watch*, marzo-abril, 1995.

SCHMIDT, SIEGFRIED (ed.), *Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus*, Suhrkamp, Frankfurt, Alemania, 1987.

SCHNEIDER, STEPHEN y PENELOPE BOSTON (eds.), *Scientists on Gaia*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1991.

SHELDRAKE, RUPERT, *A New Science of Life*, Tarcher, Los Ángeles, 1981. (Edición en castellano: *Nueva ciencia de la vida: hipótesis de la causación formativa*, Kairós, 1990.)

SLOAN, DOUGLAS (ed.), *The Computer in Education: A Critical Perspective*, Teachers College Press, Nueva York, 1985.

SPRETNAK, CHARLENE, *Lost Goddesses of Early Greece*, Beacon Press, Boston, 1981.

—, «An Introduction to Ecofeminism», *Bucknell Review*, Lewisburg, Pennsylvania, 1993.

STEWART, IAN, *Does God Play Dice?*, Blackwell, Cambridge, Massachusetts, 1989. (Edición en castellano: *¿Juega Dios a los dados?*, RBA Ed., 1994.)

THOMAS, LEWIS, *The Lives of a Cell*, Bantam, Nueva York, 1975.

UEDA, Y., J. S. THOMSEN, J. RASMUSSEN y E. MOSEKILDE, «Behavior of the Soliton to Duffing's Equation for Large Forcing Amplitudes», *Mathematical Research*, 1993, 72, pp. 149-166.

UEXKÜLL, JAKOB VON, *Umwelt und Innenwelt der Tiere*, Springer, Berlín, 1909.

ULRICH, HANS, *Management*, Haupt, Berna, Suiza, 1984.

VARELA, FRANCISCO, «Describing the Logic of the Living: The Adequacy and Limitations of the Idea of Autopoiesis», en Milan Zeleny (ed.), *Autopoiesis: A Theory of Living Organization*, North Holland, Nueva York, 1981, pp. 36-48.

VARELA, FRANCISCO, HUMBERTO MATURANA y RICARDO URIBE, «Autopoiesis: The Organization of Living Systems, Its Characterization and a Model», *BioSystems* 5, 1974, pp. 187-96.

VARELA, FRANCISCO, y ANTONIO COUTINHO, «Inmunoknowledge», en J. Brockman (ed.), *Doing Science*, Prentice-Hall, Nueva York, 1991a.

—, «Second Generation Inmune Networks», *Inmunology Today*, vol. 12, n.º 5, 1991b, pp. 159-166.

VARELA, FRANCISCO, EVAN THOMPSON y ELEANOR ROSCH, *The Embodied Mind*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1991.

VARELA, FRANCISCO, «Resonant Cell Assemblies», *Biological Research*, 28, 1995, pp. 81-95.

VERNADSKY, VLADIMIR, *The Biosphere*, publicado originalmente en 1926; reimpreso en EE.UU. por Synergetic Press, Oracle, Arizona, 1986.

WALDE, PETER, ROGER WICK, MASSIMO FRESTA, ANNAROSA MANGONE y PIER LUIGI LUISI, «Autopoietic Self-Reproduction of Fatty Acid Vesicles», *Journal of the American Chemical Society*, 1994, pp. 116, 11649-54.

WEBSTER, G. y B. C. GOODWIN, «The Origin of Species: A Structuralist Approach», *Journal of Social and Biological Structures*, vol. 5, 1982, pp. 15-47.

WEIZENBAUM, JOSEPH, *Computer Power and Human Reason*, Freeman, Nueva York, 1976.

WEINHANDL, FERDINAND (ed.), *Gestalthaftes Sehen*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1960.

WHITEHEAD, ALFRED NORTH, *Process and Reality*, Macmillan, Nueva York, 1929.

WIENER, NORBERT, *Cybernetics*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1948; reimpreso en 1961. (Edición en castellano: *Cibernética*, Tusquets, 1985.)

—, *The Human Use of the Human Beings*, Houghton Mifflin, Nueva York, 1950.

WINDELBAND, WILHELM, *A History of Philosophy*, Macmillan, Nueva York, 1901.

WINOGRAD, TERRY y FERNANDO FLORES, *Understanding Computers and Cognition*, Addison-Wesley, Nueva York, 1991.

YOVITS, MARSHALL C., y SCOTT CAMERON (eds.), *Self-Organizing Systems*, Pergamon, Nueva York, 1959.

YOVITS, MARSHALL C., GEORGE JACOBI y GORDON GOLDSTEIN (eds.), *Self-Organizing Systems*, Spartan Books, 1962.

ÍNDICE TEMÁTICO